



Salzano, Leonardo

# Modelado espectral y espacial de fuentes acústicas a través de materiales compuestos periódicos y su aplicación en la performance musical



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Argentina.  
Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 2.5  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/ar/>

Documento descargado de RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes de la Universidad Nacional de Quilmes

*Cita recomendada:*

Salzano, L. (2023). *Modelado espectral y espacial de fuentes acústicas a través de materiales compuestos periódicos y su aplicación en la performance musical. (Tesis de posgrado)*. Bernal, Argentina: Universidad Nacional de Quilmes. Disponible en RIDAA-UNQ Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes <http://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/3950>

Puede encontrar éste y otros documentos en: <https://ridaa.unq.edu.ar>

# **Modelado espectral y espacial de fuentes acústicas a través de materiales compuestos periódicos y su aplicación en la performance musical**

**TESIS DOCTORAL**

**Leonardo Salzano**

[leonardosalzano@gmail.com](mailto:leonardosalzano@gmail.com)

## **Resumen**

El uso del sonido como herramienta de expresión y comunicación en nuestra especie requirió desde un comienzo de la amplificación de sus fuentes de emisión. Esto puede remontarse a la construcción de los primeros instrumentos musicales con resonadores, continuando con el diseño de anfiteatros y de espacios cerrados para los oficios religiosos, la música y el teatro, hasta culminar con la amplificación con parlantes en el siglo pasado. En todos estos casos las técnicas están basadas o bien en alterar las fuentes de sonido (parlantes, resonadores) o bien en modificar las reflexiones que se producen en las paredes de un recinto cerrado (teatro). La presente tesis se propuso trabajar en una escala intermedia entre la fuente sonora y la sala, mediante el modelado del campo sonoro a través de materiales compuestos periódicos y su aplicación en la performance musical. Por un lado, se estudiaron las propiedades de transmisión en el rango audible de un cristal sónico de geometría variable. Se evaluaron distintas configuraciones del cristal sónico y su efecto en la localización de dos instrumentos de la familia de los saxos. Los resultados muestran que el cristal sónico es un instrumento que es capaz de reforzar o desviar la propagación de los armónicos de una nota, al variar su configuración geométrica. Por otro lado, se estudiaron las propiedades de transmisión de una malla doble acústica variable en una escultura que llamamos IRIS, formada por dos discos con perforaciones periódicas y rotación independiente. Se mostró la posibilidad de modular la localización espectral y espacial de una focalización en función del ángulo de rotación relativa entre los discos. Se derivaron posibles aplicaciones que muestran este efecto como una modulación espacial del color armónico de un tono sostenido sintetizado y como una modulación selectiva de los

armónicos de los acordes de una progresión. Por último, se realizó un experimento perceptual on-line que confirma los resultados anticipados en las medidas acústicas. A partir de los resultados preliminares de esta prueba, y de acuerdo con los resultados anticipados de las mediciones acústicas, podemos confiar en que IRIS puede funcionar como una escultura de sonido que permite modelar el timbre en el espacio por medios puramente acústicos en una situación de performance.



DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE QUILMES  
EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**Modelado espectral y espacial de fuentes acústicas a  
través de materiales compuestos periódicos y su  
aplicación en la performance musical**

Tesis doctoral presentada por Leonardo Salzano para obtener el grado de  
Doctor de la Universidad Nacional de Quilmes

---

Bajo la dirección de:

Oscar Edelstein

Manuel C. Eguia

Laboratorio de Acústica y Percepción Sonora (LAPSo)

Escuela Universitaria de Artes



*IRIS es lo múltiple en lo idéntico, lo exacto en lo impreciso, IRIS es todas las formas en un ciclo, es el tiempo agujereado en la memoria, todos los sonidos y colores la atraviesan.*

# Índice general

Agradecimientos . . . . .	IX
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis y motivación . . . . .	3
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Esquema de la tesis . . . . .	4
<b>I Primera parte</b>	<b>6</b>
<b>2. Generación y amplificación del sonido en fuentes acústicas</b>	<b>8</b>
2.1. Introducción . . . . .	8
2.2. Generadores . . . . .	10
2.2.1. Auto-Oscilador de Rayleigh . . . . .	10
2.2.2. Oscilador frotado . . . . .	11
2.3. Sistemas vibratorios . . . . .	13
2.3.1. Cuerdas . . . . .	14
2.3.2. Barras . . . . .	19
2.3.3. Tubos . . . . .	23
2.3.4. Membranas elásticas y placas circulares . . . . .	29
2.3.5. Parlantes y micrófonos . . . . .	31
2.4. Radiación . . . . .	32
2.4.1. Placas . . . . .	35
2.4.2. Tubos y Conos . . . . .	38

<b>3. Emisión con parlantes y sistemas de espacialización</b>	<b>45</b>
3.1. Introducción . . . . .	45
3.2. Localización de fuentes acústicas . . . . .	49
3.3. Panorámico de amplitud . . . . .	52
3.3.1. Configuraciones de parlantes 2D . . . . .	53
3.3.2. Configuraciones de parlantes 3D . . . . .	54
3.4. Síntesis del campo sonoro . . . . .	57
3.4.1. Ambisonics . . . . .	57
3.4.2. Wave Field Synthesis . . . . .	60
3.5. Reproducción Binaural . . . . .	62
<b>4. Propagación y proyección del sonido en entornos acústicos</b>	<b>67</b>
4.1. Introducción . . . . .	67
4.2. Propagación en salas . . . . .	71
4.2.1. Ondas estacionarias en el aire . . . . .	71
4.2.2. Transmisión resonante en estructuras . . . . .	76
4.3. Proyección con esculturas . . . . .	80
4.3.1. Reflexión con espejos acústicos parabólicos . . . . .	81
4.3.2. Refracción en cristales sónicos . . . . .	86
<b>II Segunda parte</b>	<b>93</b>
<b>5. Cristales sónicos como extensión de instrumentos musicales</b>	<b>95</b>
5.1. Introducción . . . . .	95
5.2. Cristal sónico y modelo teórico . . . . .	97
5.3. Materiales y métodos . . . . .	99
5.4. Resultados . . . . .	100
5.5. Sala Cristal Sónico . . . . .	103
<b>6. Un caso particular de estudio: mallas acústicas</b>	<b>107</b>
6.1. Introducción . . . . .	107
6.2. Transmisión en una malla acústica . . . . .	108

6.3. Transmisión en una malla doble acústica . . . . .	109
<b>7. IRIS: una escultura sonora basada en una malla doble acústica variable</b>	<b>112</b>
7.1. Introducción . . . . .	112
7.2. Desarrollo experimental . . . . .	116
7.2.1. Métodos de medición acústica . . . . .	116
7.2.2. Resultados . . . . .	119
7.3. <i>IRIS</i> como instrumento para la modulación del timbre y el espacio . . . . .	124
7.4. Test de escucha on-line . . . . .	129
7.5. <i>Iridiscente</i> . . . . .	131
7.6. <i>IRIS: Fases Múltiples</i> , una instalación interactiva de luz y sonido . . . . .	133
<b>III Conclusiones</b>	<b>135</b>
<b>IV Apéndices</b>	<b>140</b>
<b>A. Geometría de estructuras periódicas en dos dimensiones</b>	<b>141</b>
<b>B. Propagación de ondas en un medio periódico</b>	<b>145</b>
<b>C. Convolución dependiente del tiempo</b>	<b>149</b>
<b>D. Publicaciones y presentaciones</b>	<b>151</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>153</b>
<b>Referencias</b>	<b>161</b>

# Agradecimientos

Un agradecimiento especial a Oscar Edelstein, por la música, las enseñanzas y su estímulo constante en la realización de esta tesis.

A Manuel Eguia, por su apoyo, su confianza y su enorme contribución a la realización de este trabajo.

A los ex integrantes del ENS: Axel Lastra, Pablo Torterolo y Mauro Zanolli. Por las charlas tan estimulantes y los shows. A Deborah Claire Procter, por su estímulo y apoyo permanentes.

A los integrantes del LAPSo: Sol Gomez, Lucas Gonzalez, Federico Joselevich Puiggrós, Francisco Durante, Alejo Alberti, Ramiro Vergara y Ignacio Spiouzas. Por su gran aporte en la realización de *IRIS*.

A Ezequiel Hilbert y Sergio Santillán, por el registro fotográfico y fílmico. A Mene Savasta Alsina y a Nicolás Varchausky, por sus enseñanzas y el impulso que le dieron a *IRIS*.

A Cecilia Castro, Rosa Nolly y Mariana Brondino, por su participación en *IRIS: Fases Múltiples*.

A mis colegas de la UNQ, músicos y amigos, quienes de alguna colaboraron en la realización de esta tesis: Carlos Adriano Herrera, Martín Proscia, Damián Anache, Francisco Baeza, Tomás Mariani, Renzo Leveroni, Marcelo Gutfraind, Diego Campos, Lucas Percuoco, Diego Flores, Marcos Bralo y Rodrigo Soko.

A mi amiga eterna Carolina Finster. A mis padres, los “maestros” Lidia y Oscar. A mi hermana Valeria, a mi cuñado Flavio y a mis sobrinos, Luna, Iván y Laureano. A mi amor Mariano, mi compañero y mi motor.

A la Universidad Nacional de Quilmes y a la Licenciatura en Composición con Medios Electroacústicos. A la educación pública y al apoyo de CONICET.

# Capítulo 1

## Introducción

El sonido es un fenómeno físico que involucra la propagación de ondas de presión en un medio elástico. Es generado por el movimiento ondulatorio de una fuente cuya vibración origina una onda que se propaga al aire. El efecto de propagación de la onda se manifiesta en compresiones y rarefacciones de las partículas de aire, que es precisamente lo que percibimos como sonido. Sin embargo, este mecanismo constituye la base de un proceso más complejo, cuyo estudio debe realizarse sobre la base de otras variables, tales como el aporte de energía, las características de la fuente y el generador, y la acústica del entorno. Por ejemplo, si golpeamos un tambor, el resultado sonoro será distinto si damos un solo golpe con una baqueta de goma, que si hacemos un redoble con baquetas de fieltro (cambian las características del generador y el aporte de energía). Tampoco sonará igual si el parche es de cuero natural o sintético (cambian las características de la fuente), o si tocamos el tambor en una catedral o en una sala de grabación (cambia el revestimiento, cambian las propiedades acústicas del entorno). En suma, el sonido es un fenómeno acústico complejo en el que opera una dimensión temporal relativa al aporte de energía, una dimensión física relativa a las características materiales del resonador, y una dimensión espacial, relativa a las cualidades acústicas del entorno.

Una de las cualidades más significativas del sonido es el timbre, el cual constituye un parámetro multidimensional cuya configuración “es el resultado de la interacción de los parámetros que constituyen al sonido (es decir: altura, duración, intensidad, composición espectral, forma dinámica y movimiento interno o evolución melódica)” [106]. A partir de

la inclusión de objetos sonoros y nuevos instrumentos en la orquesta del siglo XIX se fue generando un interés creciente por explorar nuevos timbres, lo cual propició la invención de los instrumentos ruidistas y el desarrollo de la escultura sonora durante la primera mitad del siglo XX. Durante este periodo se fue diferenciando progresivamente el arte sonoro del arte musical, lo que dio lugar al estudio del fenómeno sonoro con un enfoque material y plástico.

A lo largo de las últimas décadas, y a la par de los desarrollos tecnológicos que dieron lugar a la corriente electroacústica y la posibilidad de distribuir parlantes en el espacio, las técnicas se orientaron a explorar el uso del espacio como dimensión estructural, tanto en la instalación sonora como en la música. Podemos definir al conjunto de las técnicas mencionadas como *modelado sonoro*, en el sentido de que desarrollan un modelo que busca la creación de forma a partir de la transformación del sonido para explorar efectos sobre la materialidad de la fuente, o del sonido como fenómeno de ondas que se propaga en el aire.

Paralelamente a la experimentación en el ámbito de la música y el arte sonoro, el problema del modelado sonoro fue abordado en el campo de la acústica arquitectónica, pero principalmente como recurso para regular la calidad acústica de los edificios construidos. Recién a comienzos del siglo pasado, y gracias a los descubrimientos del físico Wallace Sabine, se comenzó a implementar un modelo que relacionaba el volumen de un espacio, las propiedades de absorción de los materiales de las superficies y la persistencia audible del sonido. Este modelo permitió evaluar la calidad acústica de un recinto en base a la reverberación, que es el tiempo que tarda en decaer el sonido, y la respuesta espectral, la cual depende de la geometría y las resonancias del recinto y la absorción de los materiales. La posibilidad de regular la calidad acústica de una sala partiendo del uso calculado de los materiales permitió el diseño y la optimización de la mayoría de las salas modernas más notables dedicadas a la música y la oratoria, e incluso motivó la construcción de salas con acústica variable, como por ejemplo *The Resonant Chamber* diseñada por RVTR<sup>1</sup> en 2011, o el *Espace de Projection* (ESPRO) del IRCAM.

---

<sup>1</sup>RVTR es una práctica de investigación de diseño con estudios basados en Toronto, Ontario y Ann Arbor, Michigan.

## 1.1. Hipótesis y motivación

Ya sea que apliquemos transformaciones sobre la materialidad o sobre la espacialidad de las fuentes, las técnicas siempre se basan o bien en alterar las fuentes de sonido (parlantes, resonadores) o en modificar las reflexiones que se producen en las paredes de un recinto cerrado (teatro). Partiendo de esta afirmación es que surge la pregunta que define la línea de trabajo sobre la cual se desarrolla esta tesis: ¿Es posible modelar el timbre y la espacialidad de las fuentes acústicas sin alterar las propiedades de la sala y de los resonadores?.

La hipótesis que se plantea en esta tesis es que es posible modelar dinámicamente el campo sonoro de manera controlada durante la performance a través de materiales compuestos periódicos de geometría variable. Los materiales compuestos periódicos son estructuras periódicas artificiales cuyas propiedades dependen de la estructura macroscópica y no de la composición química. Estos materiales exhiben un comportamiento dinámico que incluye focalización de sonido y efectos de filtrado altamente dependientes del espacio y la frecuencia.

Un ejemplo comúnmente estudiado de material compuesto periódico son los cristales sónicos, los cuales consisten en estructuras formadas por un conjunto de tubos o prismas dispuestos en paralelo, formando una red cristalina, cuyas propiedades acústicas dependen únicamente de la geometría. Otro ejemplo comúnmente estudiado de material compuesto periódico son las mallas dobles acústicas (ADF<sup>2</sup>, las cuales consisten en estructuras de placas dobles perforadas periódicamente.

Durante las últimas dos décadas se han realizado numerosos estudios acústicos y aplicaciones de los cristales sónicos, entre los que podemos citar barreras para ruido, filtrado espacial y lentes acústicas. Por otra parte, diferentes estudios han analizado las propiedades acústicas de las ADF en el rango del ultrasonido, con el fin de mostrar posibles aplicaciones en filtros acústicos [60] o sistemas de insonorización [64, 76], Sin embargo, aún no se han explorado aplicaciones de estos fenómenos a proyecciones acústicas de instrumentos.

---

<sup>2</sup>Del inglés acoustic double fishnet.

## 1.2. Objetivos

A partir de la idea de modelar el campo acústico mediante el uso de materiales compuestos periódicos es que definimos el primer objetivo de esta tesis: estudiar las propiedades de transmisión en el rango audible de un cristal sónico de geometría variable y su posible aplicación en la performance musical. Para ello proponemos evaluar distintas configuraciones del cristal sónico y su efecto en la localización de dos instrumentos de la familia de los saxos, analizando una sección transversal del campo sonoro y grabaciones binaurales.

Como segundo objetivo nos planteamos estudiar las propiedades de transmisión en el rango audible de una malla doble acústica variable en una escultura que llamamos *IRIS*, formada por dos discos con perforaciones periódicas y rotación independiente. Para ello analizamos la posibilidad de modular la localización espectral y espacial de una focalización en función del ángulo de rotación relativa entre los discos, y de generar cambios en la diferencia interaural de nivel sonoro (ILD<sup>3</sup>) de las fuentes acústicas.

Como tercer y último objetivo queremos estudiar la aplicación de *IRIS* como instrumento para modificar de forma controlada el timbre y la espacialidad de las fuentes acústicas en situación de performance. Para ello se analizan en primer lugar los cambios en el timbre y la percepción espacial de un tono sostenido en función de la rotación continua de los discos de *IRIS*. En segundo lugar, se analizan los cambios armónicos y espaciales en una progresión de acordes en función de la rotación controlada de los discos de *IRIS*. Finalmente, para evaluar el efecto de *IRIS* en la progresión de acordes, mostramos los resultados de un test psicofísico realizado a 11 músicos, que confirman desde el aspecto perceptual los resultados anticipados en las medidas acústicas binaurales.

## 1.3. Esquema de la tesis

La presente tesis se organiza en dos partes, la primera presenta un marco general sobre los fundamentos físicos que intervienen en la generación, radiación, emisión y propagación del sonido, con ejemplos puntuales de aplicación en el campo artístico, y la segunda presenta, el desarrollo experimental y los resultados obtenidos.

---

<sup>3</sup>Del inglés interaural level difference.

En la primera parte se revisan los conceptos de la física elemental que explican la generación y radiación del sonido en cuerdas, barras, tubos, membranas, parlantes y micrófonos. Luego, se realiza una descripción de las técnicas de espacialización del sonido mediante parlantes, algunas de ellas basadas en el panorámico de intensidades como por ejemplo el estéreo o la cuadrafonía, y otras con un enfoque basado en la síntesis del campo sonoro como Ambisonics. Finalmente, la primera parte concluye con una revisión de los fenómenos acústicos derivados de la propagación del sonido en recintos, y de la reflexión y refracción en espejos acústicos parabólicos y cristales sónicos.

La segunda parte comienza reportando un trabajo en el que se propone el uso de un cristal sónico como la extensión de instrumentos musicales. Se miden diferentes configuraciones del cristal sónico y se evalúa el efecto en la localización de dos instrumentos de la familia de los saxos. Luego se describe la Sala Cristal Sónico, una sala dedicada a la instalación de performances escénicas y musicales desarrollada por nuestro grupo, la cual consiste en cinco módulos configurables de cristales sónicos. El siguiente capítulo comienza con una revisión de los principales aspectos en el estudio de las propiedades de transmisión de las mallas acústicas. Luego se reporta un trabajo en el que se muestra la implementación de una malla doble acústica en la escultura *IRIS*. El trabajo comienza con los resultados obtenidos en el análisis de un modelo tridimensional de *IRIS* realizado mediante la implementación del método de elementos finitos. En la siguiente sección se propone un montaje experimental para verificar los resultados obtenidos en el modelo predictivo, y se exponen los resultados del mismo. Posteriormente se presentan dos ejemplos que ilustran una modulación espectral y espacial generada por *IRIS* en los armónicos de un tono centrado en una banda sintetizada por frecuencia modulada, y de los acordes de una progresión. Finalmente, se reporta un test psicofísico on-line que analiza el efecto en la percepción de la modulación generada por *IRIS* en la progresión de acordes. La tesis finaliza con un capítulo de conclusiones generales y trabajo a futuro.

# Parte I

## Primera parte



## Capítulo 2

# Generación y amplificación del sonido en fuentes acústicas

### 2.1. Introducción

La base para la producción de sonido se encuentra en las leyes físicas de la vibración. Cuando aplicamos una fuerza impulsora a un material con cierta elasticidad, generamos una vibración que es producto de la interacción entre la fuerza elástica y la inercia del sistema. Para visualizar de manera sencilla este fenómeno partimos del oscilador armónico simple amortiguado, el cual se ilustra en la figura 2.1. El modelo consiste en una masa acoplada a un resorte sujeto por uno de sus extremos. Un disco está fijado a la masa y sumergido en un fluido que ejerce una fuerza amortiguadora  $-\mu y$ .

La combinación de la fuerza restauradora, gobernada por la ley de Hook, con la fuerza inercial del sistema, gobernada por la segunda ley de Newton, interactúan generando un desplazamiento sinusoidal de la masa en el tiempo cuya velocidad decae exponencialmente debido a la fricción. Suponiendo que la masa es igual a 1, este sistema lo podemos expresar como

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -\mu y - kx \end{cases} \quad (2.1)$$

donde  $\dot{x} = dx/dt$  y  $\dot{y} = dy/dt$ .

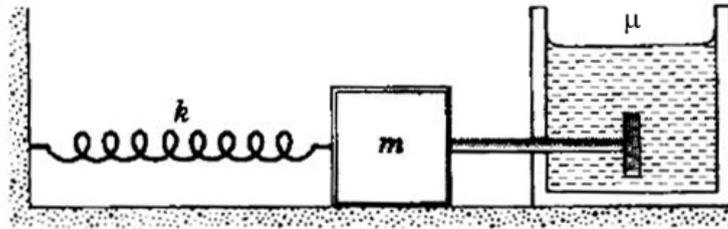


Figura 2.1: Ejemplo de oscilador armónico amortiguado. Un disco está fijo a la masa y sumergido en un fluido que ejerce una fuerza amortiguadora  $-\mu y$ . La fuerza elástica restauradora es  $-kx$ .

La primera ecuación especifica que la variación temporal de la posición corresponde a la velocidad  $y$ , y la segunda, que la variación temporal de la velocidad (es decir la aceleración) es proporcional a la posición  $x$  con una constante  $-k$  (que representa la fuerza lineal elástica), con una fricción  $-\mu y$  (con  $\mu > 0$ ), una fuerza que siempre se opone a la velocidad y que conduce a un decaimiento exponencial de la misma.

El sistema oscilatorio simple masa-resorte tiene sólo un grado de movimiento posible, pero en la práctica la gran mayoría de los sistemas vibratorios (como los resonadores de cualquier instrumento musical) son capaces de crear una infinita variedad de movimientos sinusoidales con diferentes fases, amplitudes y frecuencias. La cantidad de movimientos (también llamados grados de libertad) determina los *modos normales* de un sistema vibratorio. Dado que los modos son virtualmente independientes y cada uno tiene su propia frecuencia vibratoria, el espectro de frecuencias de todo el sistema es la combinación lineal (la suma o mezcla) de cada modo. Como el resonador principal de un instrumento musical es aproximadamente armónico en sus frecuencias de modo, la oscilación del resonador es una superposición de los modos normales, cada uno de los cuales obedece a un sistema lineal como el de la expresión 2.1. De hecho, un instrumento musical consiste en un resonador cuasi lineal (por ejemplo, una cuerda, una columna de aire o una membrana) excitado por un generador con características no-lineales. A continuación describiremos dos modelos de generadores: el auto-oscilador de Rayleigh, como un modelo simple para la oscilación de una lengüeta, y el oscilador frotado.

## 2.2. Generadores

El generador de un instrumento musical consiste en una fuerza externa que puede ser de duración limitada (instrumento percutido o pulsado) o constante (instrumento frotado o soplado). En el caso de los resonadores excitados impulsivamente, como un piano, el generador consiste en una fuerza externa de duración limitada que se comporta de manera simple para oscilaciones pequeñas pero que pueden abarcar una amplia gama de regímenes caóticos con gran excitación. Un caso más complejo lo constituyen los instrumentos de tono auto-excitados, como un violín o un clarinete, en los que la fuerza proporciona una fricción negativa de magnitud limitada que es suficiente para superar las pérdidas mecánicas y acústicas en el resonador primario y mantenerlo en oscilación. En todo este capítulo vamos a estudiar diferentes formas generales de esta fricción que de forma general vamos a ponerla como función de la posición  $x$  y de la velocidad  $y$ :

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -F(x, y)y - kx \end{cases} \quad (2.2)$$

donde  $F(x, y) = \mu$ , que corresponde a la fricción lineal.

En este capítulo presentamos dos modelos de generadores auto-excitados que exhiben una zona de fricción negativa: el modelo para la oscilación de una lengüeta de clarinete (llamado auto-Oscilador de Rayleigh) y el modelo del oscilador frotado para modelar la acción del arco stick/slip.

### 2.2.1. Auto-Oscilador de Rayleigh

El auto-oscilador de Rayleigh es un modelo propuesto por Lord Rayleigh en su Teoría del Sonido de 1865 como un modelo para la oscilación de una lengüeta de clarinete. La característica es que da una zona de fricción negativa en función de la velocidad del oscilador. De hecho esta forma aparece naturalmente cuando la fuerza que da impulso al oscilador (cuando tiene poca amplitud) es de origen aerodinámico. Entonces en su forma más simple,

con una no linealidad cuadrática podemos proponer la fricción no lineal

$$C(x, y) = y^2 - \mu \quad (2.3)$$

y entonces el sistema queda planteado como

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -(y^2 - \mu)y - kx \end{cases} \quad (2.4)$$

donde  $k$  determina la frecuencia de oscilación. El sistema anterior se puede escribir entonces, distribuyendo los dos términos de la fracción como:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = \mu y - y^3 - kx \end{cases} \quad (2.5)$$

el término  $y^3$  representa la fricción no lineal que atenúa las oscilaciones para amplitudes grandes y  $\mu y$  es la “fricción negativa” que actúa para valores pequeños de  $y$  como fuerza restitutiva y representa la acción del clarinetista generando una inestabilidad con el flujo del aire contra la lengüeta.

### 2.2.2. Oscilador frotado

El modelo del oscilador frotado es otro sistema con auto-oscilaciones simples, el cual fue propuesto por Lord Rayleigh en 1877 para modelar la acción del arco contra la cuerda del violín (en inglés *slip & stick*), pero que se puede aplicar a diversos sistemas que generan auto-oscilaciones a partir de la fricción.

El modelo propuesto era similar al de la figura 2.2. Una masa unida a un resorte está apoyada sobre una cinta transportadora con fricción que se mueve con velocidad constante hacia la derecha. Al principio el rozamiento estático hace que la masa esté adherida (momento fijado o *stick*) a la cinta y ejerce una fuerza que iguala a la del resorte. Pero la fricción estática tiene un valor máximo y cuando el resorte está muy estirado no puede superar la fuerza elástica y la masa es arrastrada por el resorte y desliza con rozamiento dinámico sobre la cinta hacia la izquierda (momento deslizando o *slip*) y puede llegar por inercia incluso a

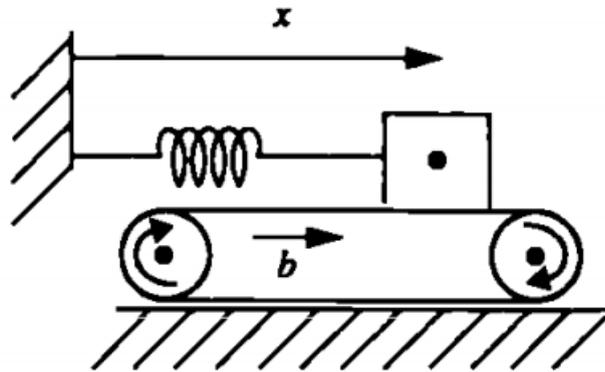


Figura 2.2: Modelo del oscilador frotado

comprimir un poco el resorte hasta que la masa se frena y queda enganchada de vuelta por el rozamiento estático y se repite el proceso.

Si bien se trata de un sistema simple, la forma funcional de la fricción (que tiene que ser función de la diferencia de velocidad entre la masa y la cinta, es decir, si desliza o no) no puede ser algo tan simple como una cuadrática o una cubica porque tiene que cambiar de signo bruscamente, ya que la fricción tiene que ser máxima para deslizamientos bajos e ir decreciendo para deslizamientos mas rápidos. La forma clásica es similar a lo que muestra la figura 2.3, donde  $\dot{x} - v$  es el “deslizamiento”, es decir la diferencia de velocidades entre la masa y la cinta.

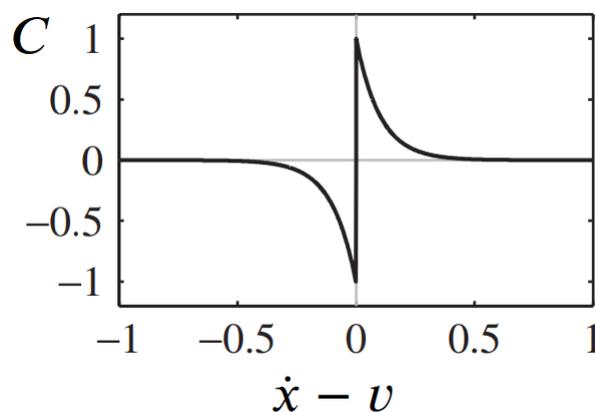


Figura 2.3: Fricción del sistema en función del deslizamiento

Cuando la masa esta adherida a la cinta  $C$  puede tomar todos los valores en la vertical

hasta un valor máximo hacia un lado y hacia el otro y luego “salta” al rozamiento dinámico, que es menor a medida que el deslizamiento es mas cada vez rápido. La forma funcional que esta representada en la figura 2.3 para el desplazamiento  $\dot{x} - v$  es:

$$C(d) = \text{sign}(d)e^{-2|d|} \quad (2.6)$$

Ese salto brusco de la función signo trae problemas numéricos, lo regularizamos con la función arco tangente del desplazamiento dividido por un numero pequeño. El arco tangente es un escalón mas suave que el signo (si el valor se hace muy pequeño se va haciendo cada vez mas parecido a la función signo).

$$C_{bow}(d) = \arctan(d/\epsilon)e^{-2|d|} \quad (2.7)$$

Con todos estos elementos la fricción del Arco propuesta por Rayleigh y el sistema final queda escrito como

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -\mu C_{bow}(y - v) - x \end{cases} \quad (2.8)$$

## 2.3. Sistemas vibratorios

En esta sección estudiamos algunos de los sistemas vibrantes más comunes, presentes en la mayoría de lo instrumentos musicales. A diferencia de los generadores, estos modelos son lineales, es decir, nos limitamos al caso de materiales cuyas relaciones tensión-deformación constitutivas son lineales.

Estudiamos aquí la clase de sólidos elásticos, es decir, aquellos materiales que tienen la propiedad de recuperar su forma original después de haber sido deformados bajo el efecto de una carga dada. Por ejemplo, si golpeamos la barra de un vibráfono con una maza suave y luego tocamos la barra para apagar el sonido, la barra no cambia su estado. La fuerza elástica interna de la barra que busca devolverla a su estado original corresponde a la *fuerza restauradora* del sistema. Por ejemplo, en las cuerdas y las membranas, la principal fuerza

restauradora es la tensión, en cambio en las barras, la principal fuerza restauradora es la rigidez.

Además de la elasticidad, la dinámica de las estructuras que son partes vibrantes de los instrumentos musicales se rigen por la rigidez geométrica. La rigidez de un material elástico es la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento resultante, y representa la constante  $k$  en el sistema resorte-masa abordado en la sección 2.1, una fuerza que se opone la inercia del sistema. La rigidez domina en el caso de cuerdas y membranas, mientras que si sólo está presente la elasticidad estamos en el caso extremo de barras y placas. Si la relación entre la fuerza, el desplazamiento y la constante del resorte es lineal, entonces tenemos un movimiento armónico simple, que es el término que se utiliza para describir la vibración de los instrumentos cuyos parciales están en relación armónica, es decir, son múltiplos enteros de la fundamental. Estos instrumentos incluyen violines, instrumentos de viento de madera, metales e instrumentos de percusión afinados.

Hay muchos sistemas de clasificación de instrumentos musicales, como las categorías tradicionales de metales, cuerdas, instrumentos de viento y percusión. Si agrupamos los instrumentos por la similitud de las ecuaciones fundamentales que gobiernan su vibración, podemos clasificarlos según el elemento vibratorio constitutivo, por ejemplo cuerdas, barras, columnas de aire, membranas y placas. Los instrumentos musicales tradicionales están hechos de colecciones de estos elementos, que son los que estudiaremos a continuación.

### 2.3.1. Cuerdas

Las cuerdas son elementos vibratorios que constan de segmentos formados por un material flexible, acoplados a puntos rígidos que permiten ajustar su tensión. Se pueden fabricar en acero, nailon, oro o tripa, lisas o entorchadas con hilos de acero, plata, oro o cobre. Los instrumentos de cuerda se suelen dividir en instrumentos de cuerda frotada, percutida y pulsada. Los instrumentos de cuerda frotada, como por ejemplo el violín, producen un sonido continuo que reemplaza la energía a medida que se disipa. En cambio, los instrumentos de cuerda impulsada, como por ejemplo la guitarra, producen un sonido que decae gradualmente hasta el silencio desde el inicio de la nota. La velocidad de decaimiento depende de la eficiencia del instrumento para irradiar energía, que a su vez determina su tasa de degradación. Al

ser elementos de poca masa, las cuerdas por sí solas no desplazan mucho aire, por lo que suelen estar acopladas al aire mediante una caja de resonancia que amplifica la vibración. Esto permite que la energía de la cuerda se transmita de manera eficiente, igualando la impedancia de la cuerda al aire.

Las cuerdas se pueden estudiar como muchos sistemas pequeños de resorte-masa concatenados, con infinitos grados de libertad de movimiento, que corresponden a los *modos normales de vibración*. La figura 2.4 muestra los primeros cinco modos normales dentro de un número infinito de grados de libertad en una cuerda ideal. En una cuerda, la energía acústica se propaga de manera transversal (o perpendicular) a la cuerda, y como sus extremos son fijos se produce un esquema vibratorio estacionario denominado *onda estacionaria*. Una onda estacionaria se forma por el desplazamiento combinado de dos o más ondas viajando en direcciones opuestas. A ciertas frecuencias, que corresponden a frecuencias de resonancia del sistema, la superposición de dos ondas viajando en sentido opuesto genera interferencia constructiva. Esto da lugar a modos normales de vibración, que vibran en relación de múltiplos enteros. Para cada modo normal (también denominado armónico) las cuerdas presentan nodos, es decir puntos de inflexión donde no hay vibración, y antinodos o puntos de máxima excursión.

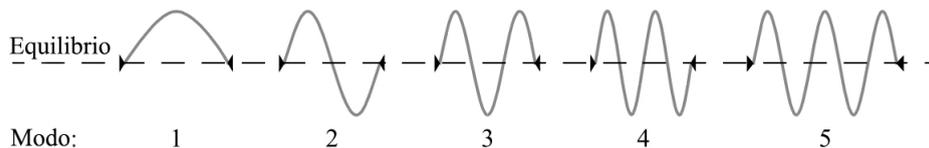


Figura 2.4: Primeros cinco modos del número infinito de grados de libertad de una cuerda ideal. Adaptado de Loy [81].

La longitud de onda  $\lambda$  del modo  $n$  se puede calcular como

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (2.9)$$

donde  $L$  es el largo de la cuerda y  $n = 1, 2, 3, \dots$

En una cuerda ideal, la tensión es la principal fuerza restauradora. Como consecuencia, la velocidad de una onda transversal propagándose a largo de la cuerda es la misma para todos

los modos. Si la velocidad es  $v_t$ , como  $\lambda = v_t/f$  (o  $f = v_t/\lambda$ ), usando 2.9 podemos expresar la frecuencia de modo  $n$  como

$$f_n = \frac{nv_t}{2L} \quad (2.10)$$

Como en una cuerda ideal,  $v_t$  no depende de la rigidez, sino que depende sólo de la masa por unidad de longitud  $m$  y su tensión  $T$ , entonces

$$v_t = \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2.11)$$

Reemplazando 2.11 en 2.10, podemos expresar la frecuencia del modo  $n$  como

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (2.12)$$

donde  $n = 1, 2, 3, \dots$

En una cuerda, la frecuencia de vibración es inversamente proporcional a su longitud (cuanto más corta la cuerda, más alta la frecuencia). Esta relación de proporcionalidad inversa, sentó las bases para el sistema de afinación pitagórico, basado en relaciones de longitudes expresadas con números pequeños, que establecieron relaciones interválicas de consonancia.

### Usos en el arte

En el campo del arte sonoro, el uso de cuerdas ha sido explorado extensamente tanto en instalaciones como en esculturas sonoras e instrumentos. Uno de los ejemplos más antiguos del uso de cuerdas en un instrumento, y que, además, se considera un antecedente de la escultura sonora es el *arpa eólica*. El arpa eólica (ver figura 2.5), cuyo nombre se origina en el dios griego Eolo<sup>1</sup>, transforma la energía del viento en sonidos musicales, que corresponden a armónicos de la nota fundamental de la cuerda que vibra. La velocidad del viento influye en la altura del sonido, y a mayor velocidad, mayor actividad de los armónicos. En un arpa eólica, el aire fluye alrededor de las cuerdas, generando vórtices que se desprenden en lados opuestos, creando fuerzas oscilantes de elevación y arrastre. Este desprendimiento de

<sup>1</sup>En la mitología griega, el dios del viento.

vórtices genera un tono eólico que, al igualar la frecuencia de un armónico de la cuerda, produce su amplificación. Si bien hubo numerosas referencias en la mitología, se podría decir que el inventor del arpa eólica fue Athanasius Kircher, quien la describe como un dispositivo “auto-operativo” [96, pág. 90].

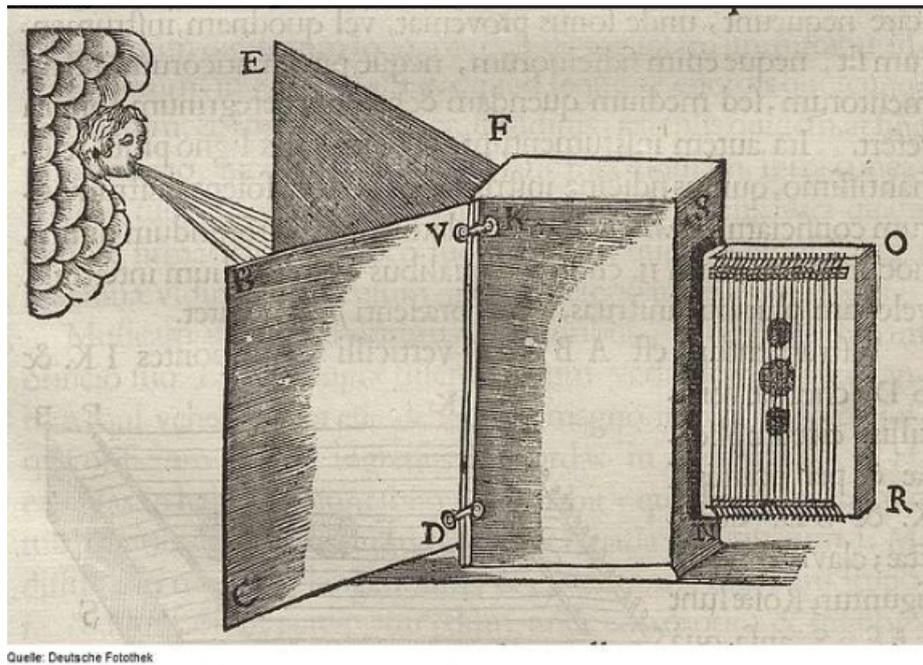


Figura 2.5: El arpa eólica, tal como la imaginó Athanasius Kircher hacia mediados del siglo XVII

En la actualidad existen numerosos ejemplos de arpas eólicas, muchas de las cuales utilizan tecnología moderna que reemplaza la caja de resonancia. Un ejemplo actual de arpa eólica es una instalación de Wolf-Dieter Trüstedt de 1988 montada en el techo del edificio de la biblioteca de la Universidad de Gante, Bélgica. La instalación consta de dos arpas de viento equipadas con siete cuerdas de acero afinadas con la misma nota. Trüstedt utiliza cuerdas de distintos grosores, lo que resulta en un “vivo espectro de armónicos” [93, pág. 110] e impide que el sonido se vuelva apagado. Los sonidos se amplificaron a través de pastillas similares a las que se usan en una guitarra eléctrica. Un aspecto interesante de esta obra es que Trüstedt utiliza estas mismas arpas en situación de concierto, como si fueran instrumentos musicales. Para ello afina sus cuerdas en la serie de armónicos y utiliza acciones bien definidas para tocarlas, ya sea “soplándolas o utilizando una púa, una varilla de vidrio, una cuerda de piano o un arco” (Ibid., p. 110).

En cuanto al uso de cuerdas en obras escultóricas vinculadas a la práctica musical, podemos destacar el trabajo de Harry Partch, músico, compositor, luthier y artista pionero del género, quien realizó adaptaciones de guitarras, violas y cítaras para componer y ejecutar sus obras musicales. Partch abogaba por el concepto de música corpórea, que se distanciaba de la tradición occidental que consideraba a la música un arte abstracto. La idea de representación corporal de la música estaba dada por “la fisicalidad del sonido, expresándose a través de los gestos vocales o musicales, o del cuerpo de los instrumentos y su sello acústico” [34, págs. 181-2]. Para sostener esta teoría, Partch diseñó su propio sistema de afinación justa, que él denominó “Monofónica”, distanciándose así del temperamento, que consideraba un sistema arbitrario de tonos donde la cualidad acústica del sonido en sí no es relevante. En contraposición visualizaba la escala como “un espacio potencialmente infinito de posibilidades en lugar de una secuencia de tonos” [17, págs. 461-2].



Figura 2.6: Guitarra adaptada II de Harry Partch, una guitarra modificada para tocar en un sistema particular de entonación justa. Fotografiado en el Instituto Harry Partch de la Universidad Estatal de Montclair (Foto: HorsePunchKid. Con licencia CC BY-SA 3.0)

De esta manera, desarrolló un sistema de afinación que consistió en una escala de 43 tonos, en base a la cual diseñó una variedad considerable de instrumentos de teclado, guitarras y violas adaptadas, cítaras y marimbas, entre otros. Por ejemplo, la *Guitarra Adaptada II*

(Figura 2.6) consiste en una guitarra de tipo hawaiana con 10 cuerdas que se pueden afinar en dos tonalidades: la Utonalidad 4/3 y la Otonalidad 16/9. La Otonalidad consiste en una tonalidad mayor basada en un hexacordio construido a partir de los seis primeros sonidos de la escala de armónicos. La Utonalidad en cambio, es la inversión de la Otonalidad, y se basa en una tonalidad menor construida a partir de los seis primeros subarmónicos.

### 2.3.2. Barras

Una barra puede vibrar longitudinalmente, es decir, estirando o comprimiendo su longitud, o de manera transversal (perpendicular). En una barra con vibración longitudinal, sus modos de vibración están en relación armónica (como en las cuerdas). En cambio, si vibra transversalmente, sus modos están en relación de múltiplos no enteros. Las frecuencias de los modos de vibración de una barra transversal son usualmente más altos que las frecuencias de los modos de vibración longitudinal. A diferencia de las cuerdas, la fuerza de restauración en una barra es enteramente debida a su rigidez. A continuación estudiamos cada caso.

#### Barras que vibran longitudinalmente

La frecuencia de vibración de una barra que vibra longitudinalmente depende principalmente de su longitud, densidad y elasticidad. La frecuencia  $f$  de modo  $n$  es

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.13)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad de Young,  $\rho$  es la densidad de masa del material,  $L$  es la longitud de la barra y  $n = 1, 2, 3$ . Acorde a 2.13 se comprueba que los modos de vibración longitudinal están en relación armónica.

Las fuerzas necesarias para estirar una barra dependen principalmente del espesor y del largo de la misma. Cuanto mayor sea el espesor o menor sea el largo, mayor fuerza se requiere. Esto puede demostrarse a partir de la siguiente fórmula.

$$F = AE \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right), \quad (2.14)$$

donde  $L_0$  es la longitud de la barra,  $\Delta L$  es el aumento de longitud,  $A$  es el espesor y  $E$  es la constante de elasticidad o módulo de Young. El módulo de Young es la relación entre el esfuerzo y la deformación de un material. Su valor depende de la naturaleza del material y se mide en pascuales (fuerza por unidad de área,  $N/m^2$ ).

### Barras que vibran transversalmente

La vibración transversal puede ocurrir cuando una barra está fija en un extremo o cuando está libre en ambos. La armónica, el clarinete o el saxo son ejemplos de instrumentos que utilizan barras o lengüetas fijas en un extremo. En cambio, el xilofón, la marimba o el glockenspiel utilizan barras libres. Al igual que en una barra con vibración longitudinal, sus modos de vibración dependen del espesor, densidad y elasticidad del material, pero también de la forma de la sección transversal. Además, las barras transversales pueden torcerse, creando modos de torsión. En la figura 2.7 se ilustran los primeros cuatro modos de vibración de las barras transversales, con extremos libres (a) y un extremo fijo (b).

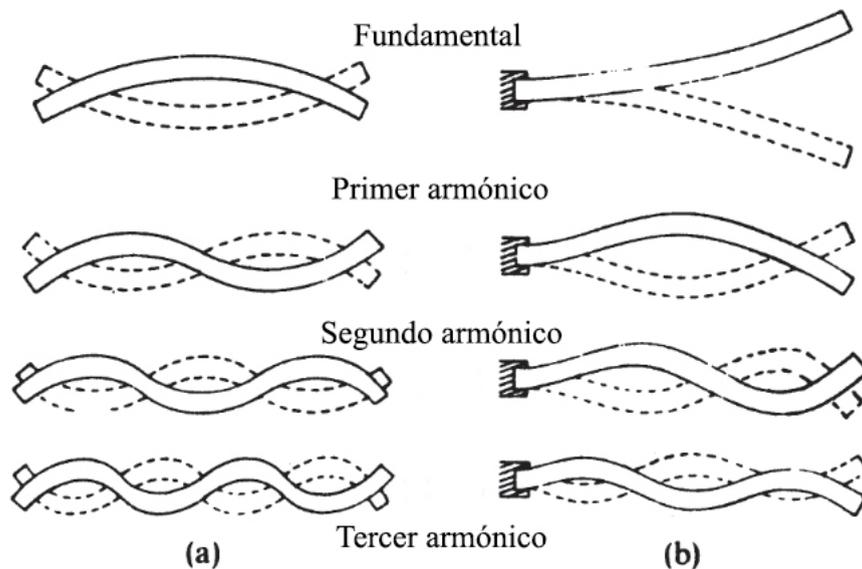


Figura 2.7: Modos de una barra longitudinal con extremos libres (a) y con un extremo fijo (b). Adaptado de Fletcher [85]

Una barra transversal fija en un extremo, también denominada *viga en voladizo*, tiene una cantidad de modos de flexión, y para cada modo el extremo libre tiene la máxima deflexión. El primer modo vibra con una simple flexión desde el extremo fijo, a la frecuencia fundamental

del sistema. El segundo modo presenta un nodo de deflexión cero en aproximadamente 0.68 de la longitud de la barra,  $L$ , el cual causa mayor flexión, generando un parcial inarmónico. El modo 3 produce dos nodos de deflexión igual a cero, produciendo aún más flexión que los dos primeros modos, y así sucesivamente. Olson [5, pág. 76] da la ecuación para la frecuencia fundamental de una viga en voladizo como

$$f_1 = \frac{0,5596}{L^2} \sqrt{\frac{EK^2}{\rho}}, \quad (2.15)$$

donde  $L$  es la longitud de la barra en metros,  $\rho$  es su densidad de masa en  $g/cm^3$ ,  $E$  es el módulo de Young y  $K$  es el radio de giro.

### Usos en el arte

Como se dijo anteriormente, la vibración transversal de una barra fijada en un extremo o *voladizo* genera un espectro rico en sobretonos no armónicos. Es precisamente esta riqueza espectral lo que hace que estas barras resulten interesantes para los artistas sonoros.

Muchos ejemplos, algunos de los cuales vamos a citar aquí, se basan en la aplicación del violín de clavos, un instrumento inventado por el violinista alemán Johann Wilde en 1740. El violín de clavos consiste en una tapa armónica de madera sobre la que se colocan clavos de hierro o de bronce de distintas longitudes. Los clavos están dispuestos para producir una escala cromática al ser frotados con un arco.

Comencemos por mencionar las esculturas de Francois y Bernard Baschet, las cuales, basándose en el principio del violín de clavos, usan varillas<sup>2</sup> de metal o vidrio que se sujetan a una placa metálica de soporte, denominada colector. Al tocar las varillas, se generan vibraciones que se trasladan al colector y luego a grandes paneles delgados de formas complejas, llamados difusores de sonido. Un ejemplo de esto es la escultura *Cristal Baschet* (1952), cuyo sonido es producido por vibraciones inducidas por fricción, resultantes del contacto deslizante entre el dedo del músico y una varilla de vidrio. Está compuesto por un gran número de varillas de vidrio conectadas a varillas metálicas vibratorias, que a su vez están unidas al colector, y este a los difusores, como se puede ver en la figura 2.8. A través de un análisis modal experimental, un estudio [75] mostró que el frotamiento de la varilla de vidrio

<sup>2</sup>Consideramos varilla como sinónimo de barra.

produce un movimiento de cuerpo rígido de traslación que se transmite a la varilla de metal vibratoria.



Figura 2.8: El Cristal Baschet, un instrumento creado por François y Bernard Baschet (Foto: Jean-Pierre Dalbéra, con licencia CC BY 2.0)

Otro ejemplo basado en el mismo principio es *Sonambient* (1959), una colección de esculturas creadas por el escultor italiano Harry Bertoia. Las esculturas *Sonambient* están formadas por una serie de varillas fijadas en una base metálica, como se muestra en la figura 2.9. Las varillas son flexibles y se mueven al tacto o al viento, y cuando chocan entre sí crean varios tonos según que varían según la longitud, la masa y el material. En *Sonambient*, Bertoia explora el uso de diferentes materiales en un “esfuerzo por producir una gama completa de tonos que no guarden relación con nuestra escala musical actual” [8, p. 20].

Además de Harry Bertoia, otros artistas utilizaron barras y varillas en sus obras. Por ejemplo, en *Pebble Chime* (2006) de Ned Kahn, las varillas no son tocadas directamente por el público sino a través de guijarros, que caen a través de una matriz de clavos de acero inoxidable incrustados dentro de una estructura del mismo material. La estructura en forma



Figura 2.9: Henry Bertoina, Esculturas sonoras, Chicago (Foto: Sharon Mollerus. Con licencia CC BY 2.0)

de hoja actúa como un resonador para amplificar los sonidos similares al agua<sup>3</sup>.

Por último, cabe mencionar la escultura *Blade* (1950), del artista neozelandés Len Lye. Si bien *Blade* no usa varillas, usa una placa rectangular en voladizo, la cual, por estar anclada en la base tiene un comportamiento similar al de una barra en sus modos de flexión. *Blade* consta de una lámina de acero de 1630 mm X 200 mm de ancho fijada a una abrazadera rígida que se desliza en cuatro cojinetes. La abrazadera está acoplada a un mecanismo que comprende un motor, una biela y un mecanismo de manivela. Este mecanismo proporciona un movimiento alternativo a la base y, a frecuencias establecidas, la lámina vibra en varias formas modales. Delante de la lámina se encuentra una varilla de acero inoxidable 500 mm de alto con una bola de corcho. A medida que aumenta la amplitud de vibración, la bola interactúa con la lámina, que se mueve y suena de manera caótica.

### 2.3.3. Tubos

Un tubo consiste en un cilindro rígido con una columna de aire en su interior, que puede actuar como resonador de cualquier fuente de sonido que se acople al tubo. Dicha fuente

<sup>3</sup><https://nedkahn.com/portfolio/pebble-chime>

puede consistir en una barra, como por ejemplo en el caso de una marimba u órgano de tubos, o en la combinación de labios y boquilla, como puede ser en el caso del saxofón. El aire en su interior se considera un medio elástico unidimensional a través del cual pueden propagarse ondas longitudinales. Un tubo puede ser abierto en ambos extremos o cerrado en uno de ellos. En la abertura se genera un antinodo de presión, es decir el aire vibra porque puede entrar y salir libremente, en cambio en el extremo cerrado, se genera un nodo, porque no hay desplazamiento de aire.

### Tubos abiertos

En un tubo abierto el aire es libre de fluir en ambos extremos, con lo cual sólo contiene modos con antinodos en los extremos. Los primeros cuatro modos de un tubo abierto se ilustran en la figura 2.10. El movimiento de las partículas de aire en un tubo abierto es similar al que se mostró para barras longitudinales.

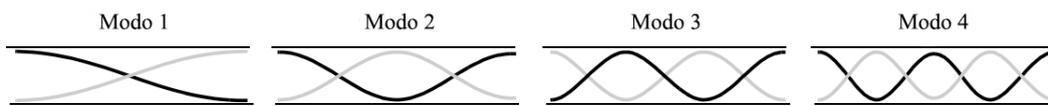


Figura 2.10: Modos de desplazamiento de tubos abiertos. Adaptado de Loy [81].

La longitud de onda del modo  $n$  es  $\lambda_n = 2L/n$ , siendo  $L$  el largo del tubo. La frecuencia del modo  $n$  de un tubo abierto es

$$f_n = \frac{\nu_t}{\lambda_n} = \frac{n\nu_t}{2L}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

### Tubos cerrados

Como el extremo cerrado está limitado a ser un nodo de la onda y el extremo abierto es un antinodo, la longitud de onda de la fundamental resulta ser cuatro veces la longitud de la columna de aire. Es decir que el modo 1 es un cuarto de longitud de onda  $\lambda_1 = 4L$ , el modo 2 es tres cuartos  $\lambda_2 = 4L/3$ , el modo 3 cinco cuartos  $\lambda_n = 4L/5$ , y así sucesivamente para cualquier modo de orden  $n$  *impar*. Los primeros cuatro modos de un tubo cerrado se ilustran en la figura 2.11.

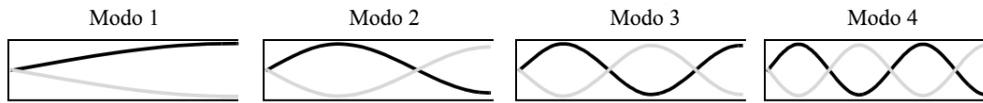


Figura 2.11: Modos de desplazamiento de tubos cerrados. Adaptado de Loy [81].

Siendo que la longitud de onda de los modos en un tubo cerrado es  $\lambda_n = 4L/n$ , la frecuencia está dada por

$$f_n = \frac{n\nu_t}{4L}, n \text{ impar} \quad (2.17)$$

### Usos en el arte

A continuación se describirán algunos ejemplos de obras escultóricas e instalaciones que incluyen tubos. Como veremos, algunas de estas obras constituyen variantes del órgano de tubos, instrumento de viento compuesto de tubos de distintas longitudes que suenan por efecto de la vibración de aire insuflado a través de fuelles mecánicos.

Tres ejemplos característicos del uso de tubos activados por el aire son *Slapped Pipes* (2007), de Bill y Mary Buchen, *Singing Ringing Tree* (2006), de Mike Tonkin y Anna Liu, y *Mirlitones* (2012), de Peter Bosch y Simone Simons. *Slapped Pipes* consiste en una escultura formada por tubos abiertos verticales de distintas longitudes dispuestos en una configuración radial, afinados en una escala pentatónica de dos octavas. La escultura puede ser activada por el viento, o por el público a través de golpes con la palma de la mano en la boca de los tubos [55]. *Singing Ringing Tree*, por su parte, es una escultura situada en el condado de Lancashire, Inglaterra, de 3 m de longitud, que consiste en una serie de tubos de acero galvanizado de longitudes variables, apilados horizontalmente formando una estructura que se asemeja a un árbol (ver figura 2.12). La escultura es activada por el viento, “produciendo un sonido coral penetrante y discordante que cubre un rango de varias octavas” [97].

Finalmente, *Mirlitones* consiste en una instalación de tubos de plástico de entre 1 y 3 m de longitud suspendidos verticalmente del techo. Cada tubo está equipado con una membrana en la parte superior que vibra gracias al aire que recibe a través de una válvula conectada a un compresor controlado digitalmente. Cada tubo actúa como una cámara de amplificación del sonido generado por la vibración de la membrana, lo que genera una combinación



Figura 2.12: Singing Ringing Tree, una escultura eólica diseñada por Mike Tonkin (Foto: Tom Blackwell, con licencia CC BY-NC 2.0)

de “frecuencias muy bajas, armónicos, ritmos y tonos que surgen de tubos que suenan simultáneamente”. *Mirlitones* es descrita por los autores como una “experiencia física y sensorial debido a sus volúmenes de sonido bastante altos y su entorno sonoro en constante cambio, enérgico e hipnótico” [99].

Otro ejemplo bien característico del uso de tubos en una obra escultórica de grandes proporciones es *Aeolus* (2012) de Luke Jerram, formada por un gran arco de acero inoxidable que soporta 320 tubos de 20 cm de diámetro. La escultura, cuya fotografía se puede ver en la figura 2.13, está rodeada por 16 postes de 32 m de largo unidos a los tubos por cuerdas de nailon tensadas de 20 m de largo que resuenan con el viento. Las cuerdas crean una resonancia audible amplificada por los tubos y los postes. A su vez, la estructura en forma de arco refleja y enfoca el sonido tanto del visitante que se para y habla debajo como de la resonancia de los tubos generada por el viento. Esta idea de amplificar la vibración mecánica de una cuerda generada por el viento a través del uso de resonadores remite a las arpas eólicas cuya descripción temprana podemos encontrar en el libro de Athanasius

Kircher, *Phonurgia nova*, publicado en 1673. De hecho *Aeolus*, cuyo nombre proviene Eolo, fue concebida para que funcione “como un arpa eólica gigante que produce sonidos hermosos y sobrenaturales” [101]. La idea de captar y modelar los sonidos de la naturaleza está presente en esta obra, mediante la búsqueda de amplificar la frecuencia de la vibración de las cuerdas según cambia la velocidad del viento y así “generar una serie armónica que responde con intervalos consonantes de una manera muy musical”.



Figura 2.13: La escultura Aeolus, diseñada por el artista Luke Jerram en el distrito de Tower Hamlets en Canary Wharf, Londres, en marzo de 2012. Está diseñada para cantar con el viento sin necesidad de energía eléctrica. (Con licencia CC BY-SA 3.0)

Además del viento, se han explorado otros mecanismos de activación, como por ejemplo a través del gas. Un ejemplo de esto es la obra *Singende Flammen* (1988), de Andreas Oldörp. Para esta obra el artista dispuso nueve quemadores de gas equipados con tubos de igual longitud y diferentes diámetros, distribuidos en el refugio antiaéreo debajo de Hans-Albers-Platz en Hamburgo. Inspirado en el Pirófono, la primera versión del órgano de fuego (inventado por el físico Georges Frédéric Eugène Kastner en 1875), donde el sonido es producido por

combustión de hidrógeno con oxígeno en tubos de cristal de distintas longitudes, Oldörp generó distintos tonos superpuestos que variaban de acuerdo a los cambios de temperatura, la presión del aire, la humedad y el tamaño de la llama. El mismo principio fue utilizado por Trimpin en *FireOrgan* (1993), un órgano de tubos de vidrio pyrex, cada uno equipado con un mechero de llama variable, cuyo tamaño e intensidad podía ser controlado por software, lo que generaba cambios simultáneos en la frecuencia del sonido y el color de la llama.

Otros mecanismo de activación muy explorado es a través del efecto del oleaje del mar. Un ejemplo de esto es la obra *Órgano de Mar* (1995), cuya fotografía se puede ver en la figura 2.14. El *Órgano de Mar* fue construido según planos del arquitecto Nikola Bašić y consiste en un instrumento musical natural de 70 metros de largo que usa 35 tubos de órgano extendidos horizontalmente bajo el concreto. Los tubos son activados por aire comprimido directamente por el movimiento del oleaje del mar.



Figura 2.14: Órgano de mar en Zadar, Construido según planos del arquitecto Nikola Bašić. (Foto: Böhringer Friedrich, con licencia CC BY-SA 2.5)

Finalmente, con un enfoque orientado a promover una nueva calidad de audición de los sonidos urbanos, la obra *Sonic Nomad Sofa*, de los arquitectos René Rissland y Jürgen Lehmeier, usa tubos de drenaje que actúan como filtros y “transforman los ruidos ambientales molestos en sonidos más armoniosos” [117]. La obra propone un objeto móvil multifuncional en forma de panel formado por 270 tubos de pvc de 10 cm de diámetro de longitudes

diferentes y unidos entre sí. Hay nueve diferentes longitudes de tubos que resuenan en una nota particular, formando una escala de nueve tonos. A su vez, esta diferencia forma una cavidad cóncava donde la gente puede sentarse y escuchar los sonidos urbanos.

### 2.3.4. Membranas elásticas y placas circulares

Las membranas elásticas son el equivalente bidimensional de las cuerdas, donde la fuerza de restauración depende de la tensión. Mientras que en una cuerda los modos son armónicos, en las membranas son inarmónicos. Las placas, en cambio, son el equivalente bidimensional de las barras transversales, donde la fuerza de restauración depende de la rigidez del material. Mientras que las membranas se fijan y se tensan por el borde, las placas se pueden sujetar en el borde, en el centro o pueden vibrar libremente. Las membranas se suelen fabricar con materiales de base natural como caucho, o sintéticos como tereftalato de polietileno, mientras que las placas normalmente se fabrican con aleaciones de bronce o latón. Un tambor de batería es un ejemplo de una membrana elástica tensada por el borde, mientras que un platillo es un ejemplo de una placa sujeta por el centro.

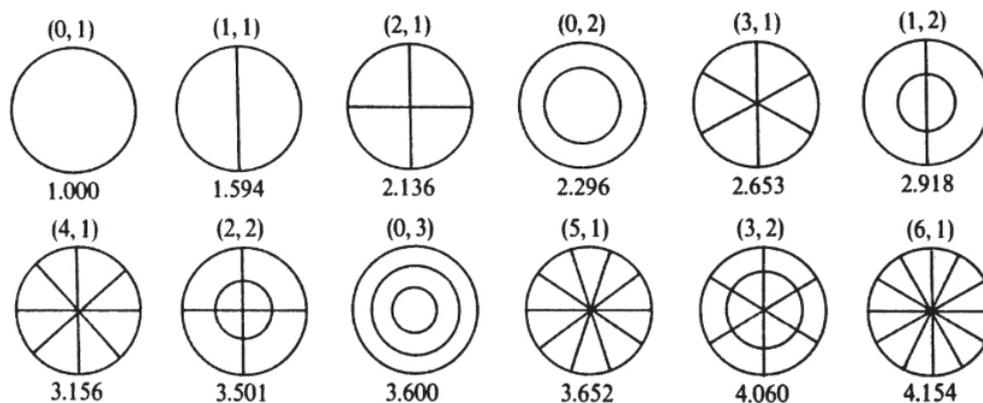


Figura 2.15: Primeros 14 modos de una membrana ideal. Arriba de cada figura se indica el nodo radial  $m$  y concéntrico  $n$  como  $(m, n)$ , y abajo, la frecuencia relativa de cada modo. Extraído de Fletcher [85]

Tanto en las membranas como en las placas circulares existen dos tipos de modos de vibración: radial y concéntrico. Estos suelen ser clasificados por dos números: el primero indica el número de nodos radiales, y el segundo indica el número de nodos concéntricos. En

la figura 2.15 se ilustran los primeros 14 modos de vibración de una membrana ideal. Arriba de cada forma modal se indica el número de nodos radiales y concéntricos y la frecuencia de modo relativa. Esta clasificación se aplica únicamente a membranas y placas sujetas o apoyadas en el borde. No aplica a placas apoyadas en el centro o sin apoyo, porque estos sistemas tienen un antinodo en el borde.

La frecuencia fundamental de vibración  $f$  de una membrana circular tensada en el borde está dada por

$$f = \frac{0,765}{d} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}, \quad (2.18)$$

donde  $\sigma$  es la densidad de área,  $d$  es el diámetro de la membrana y  $T$  es la tensión.

### Usos en el arte

Una obra que sirve como ejemplo para ilustrar el uso de una membrana estirada en un tambor es *Drum* (1974), de Stephan von Huene, la cual consiste en 32 martillos que golpean una membrana de acrílico mediante un sistema electro-neumático. La nueva versión, de 1992 está equipada con un sensor que activa su reproducción al acercarse el público. Otro ejemplo puntual con membranas es la obra *Branen* (2009), de Christof Schläger, la cual consiste en 16 membranas de plástico, cada una colocada sobre un anillo de metal. Detrás de cada membrana el artista coloca un anillo de cartón móvil que sirve como resonador e influye en el timbre del sonido. El aire comprimido llega a cada membrana a través de una manguera, y las variaciones en la presión del aire influyen en la amplitud del sonido. Otro enfoque del uso de membranas es la obra *Sonic Range* (1992), de Ned Kahn, la cual evoca “el movimiento de la tectónica de placas y la licuación de sedimentos que se produce durante los terremotos”. Consiste en una membrana sembrada en la superficie con polvo de cobre fino, que vibra mediante el sonido. El público puede “alterar el patrón de zonas de subducción en miniatura, líneas de falla y géiseres eruptivos cambiando la frecuencia y amplitud de las vibraciones” <sup>4</sup>.

En el caso de las placas, un ejemplo de aplicación es la obra *Vardøger* (2018– 2019), de Asbjørn Blokkum Flø, la cual fue propuesta como una instalación que explora “estructu-

<sup>4</sup><http://nedkahn.com/portfolio/sonic-range>

ras y patrones acústicos y su relación con el material físico” [111, pág. 230]. La instalación consiste en una colección de varillas de bronce acopladas a placas de metal circulares suspendidas horizontalmente. Las varillas son excitadas mediante golpes y frotamiento a través de un mecanismo controlado electromagnéticamente. El timbre de la varilla es “coloreado” por la resonancia de la placa acoplada a la varilla. En el transcurso del desarrollo de la obra (que hasta la fecha sigue en proceso), el autor aplica un método de trabajo que combina conocimientos de la metalurgia, la acústica y la espectromorfología para el análisis de las propiedades acústicas de las varillas y las placas. Se interesa por la influencia del tipo de aleación y de algunos parámetros como la densidad y la elasticidad del material en la localización de los parciales en el espectro. Además estudia el modo en que el timbre es moldeado por las dimensiones del material, lo cual se relaciona a lo que en espectromorfología se conoce como espacio espectral y densidad.

### 2.3.5. Parlantes y micrófonos

Los parlantes y los micrófonos también pueden funcionar como generadores y modeladores del sonido. Para convertirse en reproductores ideales, los micrófonos y los parlantes deben ser lo más transparente posible mientras transducen (convierten) las ondas de presión de aire en una señal eléctrica y viceversa. Es decir, deben reproducir el sonido sin que ellas mismas sean audibles [109, pág. 16].

El funcionamiento de un parlante se basa en una corriente eléctrica que genera un campo magnético. Dicho campo mueve un electroimán bobinado acoplado a una bocina, que a su vez genera ondas de presión en el aire que se traducen como sonido. En un micrófono el proceso es inverso: un diafragma vibra de acuerdo con las variaciones de presión de su entorno. Con la ayuda de un electroimán y un imán permanente, la vibración del diafragma se transforman en una corriente eléctrica. Pero estos dispositivos no son lineales, dado que exhiben cambios térmicos, asimetrías e irregularidades en la superficie, que se traducen en cierta distorsión armónica e intermodulación (en un parlante es algo menos del 1 por ciento de la amplitud total). Es decir, considerados como “motores acústicos”<sup>5</sup> el material vibrante (la membrana, la bocina) vibrará con mayor amplitud en ciertas frecuencias que en otras

---

<sup>5</sup>Término acuñado por Roelof Vermeulen

(frecuencias resonantes). Es decir que no existe un tipo de parlante o micrófono ideal y por lo tanto cada uno “sonará” de manera diferente.

En la serie de tres instalaciones *Ideofoon* (1970-71) el artista holandés Dick Raaijmakers explora la “verdadera naturaleza” [6, pág. 14] del parlante utilizando el movimiento físico de la bocina para hacer vibrar objetos colocados dentro del cono. En *Ideofoon I* (1970), por ejemplo, utiliza 36 parlantes idénticos, cada uno equipado con un tubo de 30 cm de largo x 2 de diámetro conteniendo una pequeña bola de acero sobre un pequeño resorte ubicado en el eje del cono. Raaijmakers conecta los polos de una batería al final del resorte y a la entrada regular del parlante generando la expansión del cono, cuyo movimiento depende del contacto de la bola con el resorte. De esta forma, Raaijmakers busca que el parlante “modele” a la corriente eléctrica, que a su vez se transforma en ondas de presión en el aire generadas por la vibración de objetos físicos colocados en la bocina.

De manera similar, en su pieza *Intona* (1991) Raaijmakers busca la “voz distintiva” de los micrófonos, haciendo vibrar el diafragma con un taladro, una sierra o agua hirviendo. De esta manera, el micrófono revela su propia voz, cambiando su función de reproducción a producción de sonido.

## 2.4. Radiación

En este capítulo nos interesa estudiar la forma en que los cuerpos que vibran se acoplan al aire y excitan las ondas sonoras. La forma en la que dichos cuerpos interactúan con el aire tiene dos aspectos interesantes: la emisión o radiación de energía acústica y la resistencia que opone el aire a la vibración, asimilable a una impedancia mecánica (o acústica), conocida como *impedancia de radiación*.

El radiador más elemental es una esfera pulsante (también llamada fuente puntual *monopolar*) de radio promedio  $a$  que oscila con el tiempo. La figura 2.16 muestra una ilustración esquemática de una esfera pulsante de radio  $a$ . En un medio homogéneo e isótropo, la esfera pulsante produce una onda de presión que es esférica, saliente y con las mismas propiedades en todas las direcciones. Matemáticamente, esta onda de presión sólo depende de la variable radial  $r$  y el tiempo  $t$ , es decir se describe por una función real  $p(r, t)$ . La parte real de la

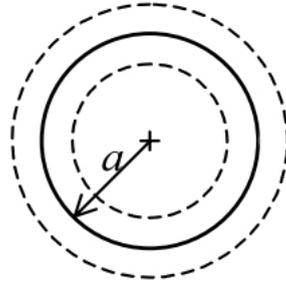


Figura 2.16: Esfera pulsante de radio  $a$ . Adaptado de Miyara [43]

presión compleja de la onda esférica se escribe como

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{i(\omega t - kr)} \quad (2.19)$$

donde  $k = \omega/c$ . Esta es una onda radial de frecuencia  $\omega$  y amplitud  $A$ , que se desplaza con la velocidad del sonido  $c$  y cuya amplitud decae con la distancia como  $1/r$ .

La velocidad de la partícula acústica  $u$  en una onda esférica es

$$u(r, t) = \frac{A}{r\rho c} \left( 1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{-jkr} e^{j\omega t} \quad (2.20)$$

La relación entre la presión y la velocidad de las partículas da la impedancia acústica específica para una onda esférica que depende de la distancia desde el origen de la onda:

$$z = \frac{p}{u} = \rho c \left( \frac{jkr}{1 + jkr} \right) \quad (2.21)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire. Cerca del origen, cuando  $kr \rightarrow 0$   $z \ll \rho c$ . A distancias más largas,  $z \rightarrow \rho c$ .

La impedancia acústica vista por la superficie de la fuente se denomina impedancia acústica de radiación  $z_r$  y corresponde al caso en que  $r = a$  en la ecuación anterior:

$$z_r = \rho_0 c \left( \frac{(ka)^2}{1 + (ka)^2} + j \frac{ka}{1 + (ka)^2} \right) \quad (2.22)$$

Usualmente, la impedancia de radiación se presenta gráficamente en forma de resistencia a la radiación y reactancia reducidas  $Z = R_j + jX_j = z_r/\rho_0 c$ . La resistencia de radiación  $R_j$

representa la habilidad de la fuente de propagar sonido en el campo lejano, mientras que la reactancia  $X_j$  representa la energía transferida a la velocidad de las partículas en la vecindad directa de la fuente. Las funciones de la figura 2.17 muestran que una esfera pulsante alcanza su máxima eficacia en la propagación de energía al campo sonoro para un radio de esfera igual o más grande que  $0.5\lambda$  ( $ka > 3$ ). Por debajo de  $a = 0,16\lambda$  ( $ka = 1$ ), la reactancia es más grande que la resistencia, es decir la energía se transfiere más eficientemente en el campo cercano que en el lejano.

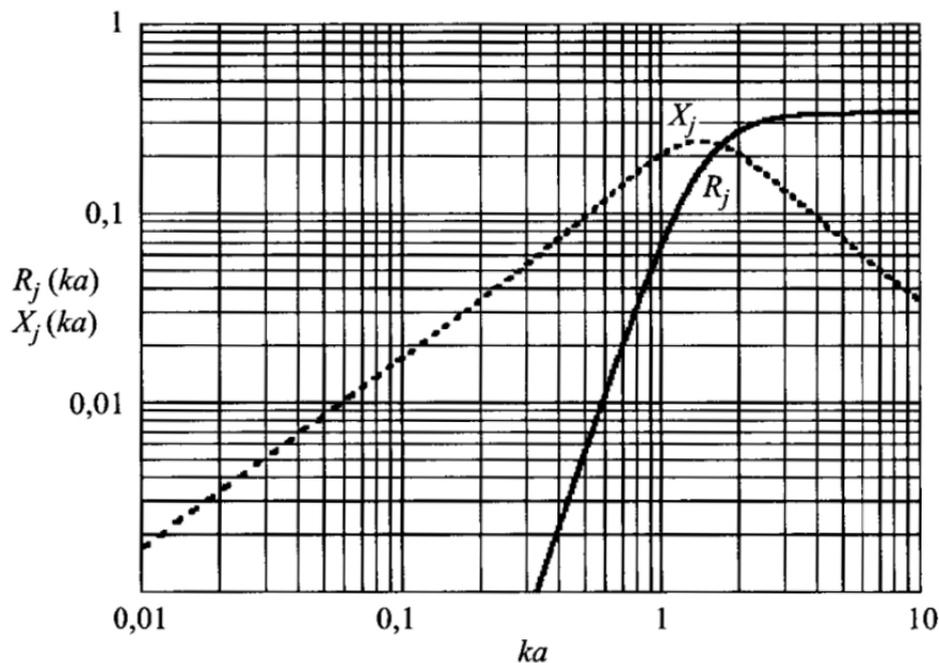


Figura 2.17: Resistencia a la radiación y reactancia de una esfera pulsante de radio  $a$ . Tomado de la referencia [56]

En general, para una fuente esférica con  $ka < 0,3$  (rango de baja frecuencia) la preponderancia de la reactancia significa que la mayoría de la energía es transmitida a la masa de aire que rodea la fuente en su vecindad inmediata.

Las fuentes simples monopulares pueden combinarse para formar fuentes compuestas, siendo el ejemplo más sencillo el de una esfera oscilante o dipolo. Una fuente dipolo consiste en dos fuentes puntuales monopulares actuando en oposición de fase y a una distancia infinitamente pequeña entre sí. Otro tipo de fuentes incluyen cuadrupolos o fuentes dispuestas

linealmente de varios tipos y fases mutuas de pulsación. Para una referencia ampliada ver [44, pág. 146].

### 2.4.1. Placas

Para tratar de comprender cómo irradia sonido una placa es bastante instructivo representar la radiación de los modos de placa como una grilla bidimensional con líneas nodales en las direcciones  $x$  y  $y$ . Las líneas nodales subdividen la placa en superficies rectangulares que al vibrar generan movimientos del fluido y cuya interacción resulta en compresiones y rarefacciones que irradian sonido. Debido a estas interacciones, la potencia de sonido radiada por la placa esta relacionada con la cantidad de modos presentes.

El sonido radiado se puede modelar en términos de fuentes de sonido monopolo, dipolo y cuadrupolo. Las superficies vibrantes centrales de la placa constituyen fuentes cuadrupolares (grupos de cuatro subsecciones que se cancelan entre sí al oscilar), los bordes comprenden una línea de fuentes dipolares (grupos de dos subsecciones fuera de fase que se cancelan entre sí al oscilar) y las esquinas son fuentes monopulares. La radiación de las fuentes monopulares son más efectivas que las fuentes dipolares, por lo tanto, solo las esquinas de la placa irradian sonido de manera eficiente.

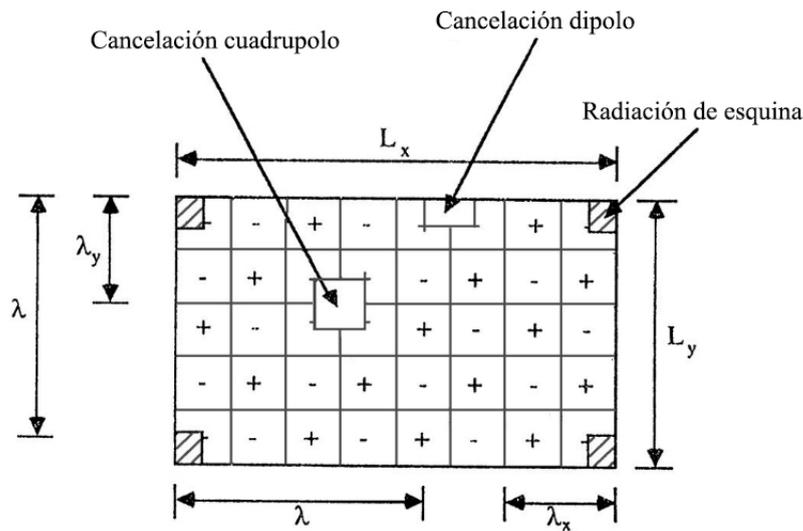


Figura 2.18: Ilustración esquemática de la radiación de esquina en una placa finita. Adaptación de Norton [44]

La figura 2.18 ilustra la forma modal de un modo típico de una placa rectangular, en la que la longitud de la onda de flexión en la placa en ambas direcciones  $x$  e  $y$  es menor que la correspondiente longitud de onda acústica en el aire a la misma frecuencia ( $\lambda_x$  y  $\lambda_y > \lambda$ ). Esto provoca que el fluido que es desplazado hacia afuera por una subsección positiva es transferido a una subsección negativa sin ser comprimido. Como consecuencia, muy poco sonido es radiado. Esta situación es representativa de los modos de esquina. Si las longitudes de la placa son mucho menores que una longitud de onda acústica ( $L_x$  y  $L_y < \lambda$ ), las cuatro esquinas monopulares interactúan entre sí, y esa interacción depende de sus fases respectivas. En el caso de que  $L_x$  y  $L_y > \lambda$  (como el de la figura 2.18), las cuatro esquinas radian como cuatro fuentes monopulares desacopladas.

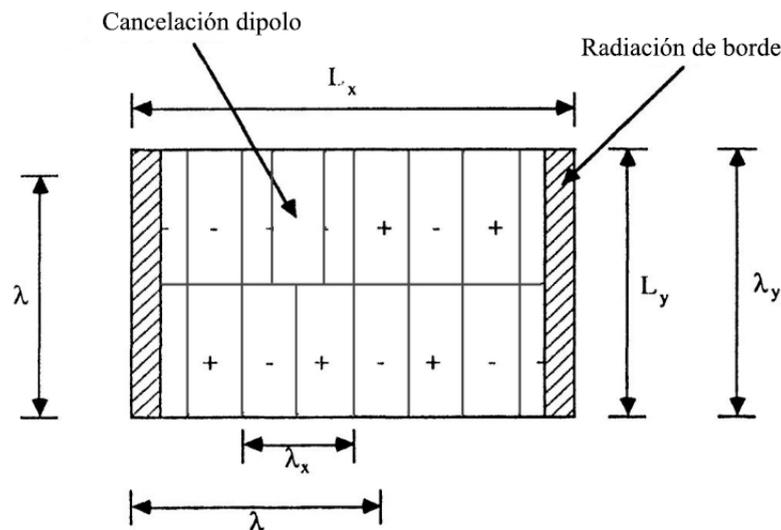


Figura 2.19: Ilustración esquemática de la radiación de borde en una placa finita. Adaptación de Norton [44]

La figura 2.19 ilustra la situación representativa de los modos de borde. En este caso, la longitud de onda de la onda de flexión en la estructura en la dirección  $x$  es menor que la longitud de onda acústica (es decir,  $\lambda_x < \lambda$ ), y en la dirección  $y$  es mayor ( $\lambda_y > \lambda$ ). Las regiones centrales de la placa forman dipolos largos y estrechos, que se cancelan entre sí, en cambio en los bordes, a lo largo de la dirección  $y$  no se cancelan. En consecuencia, el fluido que se desplaza hacia afuera por una subsección positiva (en la dirección  $y$ ) se comprime cuando se transfiere a la subsección negativa adyacente y la radiación es eficiente. Los modos

de borde son radiadores más eficientes que los modos de esquina.

La frecuencia a la cual la velocidad de la onda de flexión en la estructura es igual a la velocidad del sonido se la denomina frecuencia crítica  $f_c$ . A medida que la frecuencia de excitación se acerca a  $f_c$ , la cancelación en las secciones centrales disminuye y se descompone totalmente en y por encima de  $f_c$ . Como consecuencia de esto, toda la placa irradia sonido. Esto ocurre porque tanto  $\lambda_x$  como  $\lambda_y$  son mayores que la longitud de onda acústica correspondiente  $\lambda$  a la misma frecuencia. El sonido que se desplaza hacia afuera por las subsecciones positivas (en ambas direcciones  $x$  e  $y$ ) se comprime en las subsecciones negativas adyacentes. Estos modos, llamados modos de superficie, son radiadores de sonido muy eficientes.

### Usos en el arte

Una aplicación muy extendida de placas en el arte sonoro se basa en la utilización de señales producidas electrónicamente para crear bucles de retroalimentación entre la vibración acústica de las placas excitadas y las señales producidas electrónicamente, y experimentar con frecuencias resonantes naturales de placas de metal. Esta idea ha inspirado de forma recurrente el trabajo del artista Ted Apel, a quien le interesa “investigar la relación entre los elementos visuales y sonoros de la escultura sonora”, a través de un diálogo entre las texturas sonoras y visuales de las placas, donde la percepción del timbre se ve reforzada por las cualidades físicas de las placas. Un ejemplo de esto es *Portrait of Malleus* (1997), la cual consiste en una placa de bronce de 20” X 30” suspendida de la pared. La placa es excitada electromagnéticamente para producir “una música tranquila y en constante cambio”. Otro ejemplo similar del mismo autor es *Surfaces Osculations* (1998), la cual consiste en una instalación que utiliza dos chapas de acero suspendidas del techo, cuya vibración es transmitida electrónicamente a una computadora que a su vez procesa y devuelve la señal a la placa misma. El sonido resultante es una combinación de la resonancia de la placa y la señal procesada.

Esta misma idea pero explorando el uso de cuerdas como mecanismo de acople entre la vibración y la placa aparece en *Resonant Platinum Records* (2012) de Gordon Monahan. Para esta obra se utilizan doce placas de aluminio suspendidas del techo con cuerdas de piano. A través de las cuerdas se transmite la vibración del sonido generado mediante una

colección de archivos de sonido a las placas, aludiendo a una forma sonora que es modelada mediante el movimiento del sonido en el espacio. Siguiendo el mismo concepto pero aplicado a un enfoque más ecológico, en su otra obra *Aquaeolian Music Room* (1991), Monahan usa láminas de aluminio para amplificar los sonidos generados por el movimiento del agua sobre varias cuerdas de piano de 35 m de longitud ancladas en el Río Wupper, Alemania.

En una misma línea, pero con una propuesta enfocada en lo musical, están las esculturas del músico y luthier estadounidense Tom Nunn, que él denomina como *Electroacoustic Percussion Boards* (EPB). Las mismas constan de placas de madera contrachapada, cortadas en formas particulares, sobre las que monta diversos objetos vibratorios como resortes, corchos, peines y varillas que se tocan raspando, punteando o golpeando. El primer prototipo, llamado *avicle Board*, amplificaba el sonido acústicamente a través de la placa de madera contrachapada, mientras que los EPB posteriores contaban con un sistema de amplificación mediante un micrófono de contacto acoplado a la madera.

Finalmente, con un enfoque totalmente distinto, la obra *Motor Music Test* de Daito Manabe utiliza placas de metal, cada una unida a un servomotor de alta resistencia. Los servos están programados para rotar con una lógica que sigue una secuencia definida, y cuyo zumbido crea una variación de frases rítmicas que es amplificada por las placas que rotan.

### 2.4.2. Tubos y Conos

Un criterio para estimar el campo de sonido radiado por un tubo cilíndrico con un extremo cerrado o un tubo cilíndrico cerrado que abre hacia una sección cónica abierta es la relación que hay entre su dimensión más larga  $L$  y la longitud de onda  $\lambda$ . En la región de baja frecuencia donde

$$kL = \frac{2\pi L}{\lambda} < 1 \quad (2.23)$$

la radiación es dominada por la difracción y la radiación de campo lejano es aproximadamente isotrópica (independiente del ángulo). En esta región de frecuencia, la radiación de campo lejano tiene frentes de onda que son superficies esféricas concéntricas, cuya presión es independiente del ángulo e inversamente proporcional al radio. Este tipo de fuente es el que describimos en 2.4 como fuente monopolo, cuyo campo de radiación se comporta como

una esfera pulsante cuyo radio se expande y contrae periódicamente, y que debe generar por simetría un campo de onda esférica en la región del espacio fuera de la superficie de la esfera.

Ahora estudiemos la transición entre el campo de radiación interno al externo. El valor instantáneo en el tiempo  $t$  de la presión acústica a una distancia  $x$  del extremo cerrado de un tubo cilíndrico, para una onda que viaja en la dirección positiva se puede escribir como

$$p_+ = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (2.24)$$

donde  $A$  es la amplitud,  $\omega = 2\pi f$  y  $k = 2\pi/\lambda$ . La ecuación 2.24 corresponde a la solución de la ecuación de onda en el dominio de la frecuencia, que se define como una superficie de fase constante desplazándose en la dimensión  $x$ . La variable  $x$  implica que los frentes de onda son planos perpendiculares al eje del tubo. Esta suposición de propagación de onda plana [104, pág. 352] es válida para un tubo cilíndrico de radio  $a$  hasta una frecuencia límite  $f_{lim}$  dada por la ecuación

$$f_{lim} = \frac{1,84c}{2\pi a} \quad (2.25)$$

La ecuación 2.25 relaciona el comportamiento de la onda con la condición de contorno impuesta por la pared rígida del tubo. En el extremo abierto, esta condición cambia repentinamente y la onda es libre de propagarse en cualquier dirección en el espacio infinito (ver figura 2.20). La ecuación de onda muestra que fuera del tubo los frentes de onda ya no son planos sino superficies esféricas.

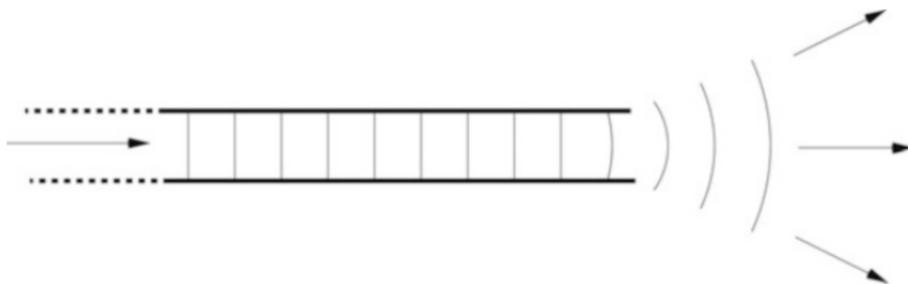


Figura 2.20: Radiación sonora desde el extremo de un tubo cilíndrico. Extraído de Campbell [118]

En el caso de una fuente con perfil de orificio con una longitud significativa de tubo

cilíndrico que se abre en una sección cónica, los frentes de onda son planos en la sección cilíndrica y, teóricamente, esféricos desde el extremo abierto del cilindro, siempre y cuando la longitud de onda sea mucho mayor que el diámetro del tubo [118, pág. 184]. En la región comprendida entre la sección cilíndrica y la sección cónica ocurre una transición donde los frentes de onda planos que se acercan a la salida del cilindro desarrollan gradualmente la curvatura que es característica de las ondas esféricas externas. Esta transición se ilustra en la figura 2.21, donde se observa un perfil de orificio que se asemeja a una campana ensamblada a partir de tres secciones cónicas de apertura creciente. Los frentes de onda esféricos salientes parten sucesivamente de los conos centrados en los vértices A, B y C.

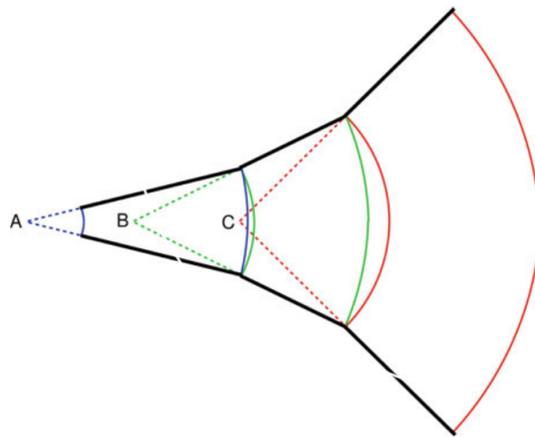


Figura 2.21: Perfil de orificio que se asemeja a una campana a partir de tres secciones cónicas con un ángulo de apertura creciente. Las líneas sólidas representan ondas esféricas centradas en A (azul), B (verde) y C (rojo). Extraído de Campbell [118]

Sin embargo, esto que es aproximadamente cierto a bajas frecuencias, a frecuencias más altas, la transición repentina de una pared límite rígida al espacio libre genera un abultamiento que da como resultado la transferencia de parte de la energía del sonido a modos no esféricos. El progresivo ángulo de ensanchamiento de la sección cónica genera un desplazamiento del centro de las ondas cuasi-esféricas que se mueven constantemente hacia la salida de la campana, lo que resulta en una transferencia de energía del modo esférico a modos superiores (no esféricos), alterando la forma de los frentes de onda (Ibid., p. 185).

Otro factor importante que afecta la manera en que el sonido es radiado es la *directividad* de la fuente. En la región del campo lejano, todas las fuentes acústicas se caracterizan por

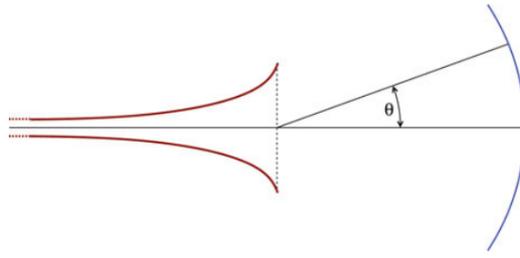


Figura 2.22: Ilustración de la definición del ángulo de directividad  $\theta$ . Extraído de Campbell [118]

frentes de onda esféricas y una amplitud de presión que es inversamente proporcional al radio. Sin embargo, la amplitud de presión puede variar con el ángulo de directividad  $\theta$  formado entre el eje del tubo y la dirección de radiación. La figura 2.22 ilustra la definición del ángulo  $\theta$ . La presión en el campo lejano para una fuente acústica axisimétrica se puede expresar como

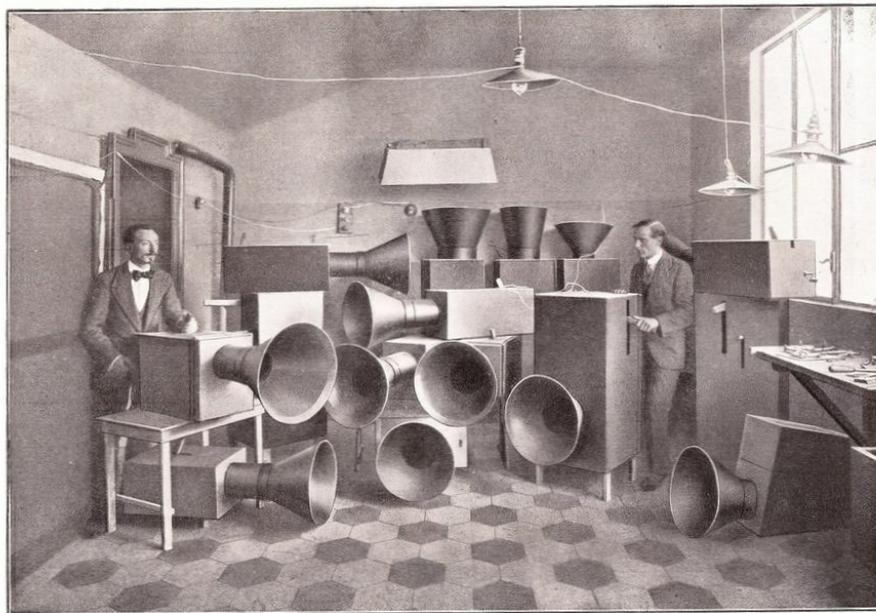
$$p_+ = \frac{A}{r} H(\theta, f) e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.26)$$

donde el factor direccional  $H(\theta, f)$  describe la dependencia angular de la radiación para puntos en el frente de onda esférico con radio  $r$ .  $H(0, f)$  es la presión en el eje del tubo. Para una fuente monopolo  $H(0, f) = 1$ , independientemente de la frecuencia y el ángulo. Para una fuente dipolo,  $H(0, f) = \cos\theta$ . Por encima del límite de frecuencia de la aproximación monopolo, la intensidad del sonido radiado no es más uniforme sobre una superficie esférica y la energía direccional cada vez más a lo largo del eje del tubo. Una medida óptima para estimar la directividad en una dirección particular es el índice de directividad  $DI(\theta, f)$ , que corresponde al nivel de intensidad en el eje comparado con el nivel de intensidad producido por una fuente isotrópica con la misma potencia radiada total.

### Usos en el arte

Las primeras referencias del uso de conos como radiadores en el arte datan de la antigua Grecia, hacia el siglo V a. C., por ejemplo en su aplicación en máscaras para amplificar las voces de los oradores en los teatros [49, pág. 6]. Muy posteriormente, en el siglo XVII, surgió la trompeta de voz para comunicar mensajes a distancia, cuya invención se adjudica tanto

al matemático Samuel Morland como a Athanasius Kircher. El primero publicó una serie de ensayos sobre la *Tuba Stentoro-Phonica*, en el cual describe “una trompeta de cobre de 21 pies de largo, con una campana de 2 pies de ancho, transmitió el habla hasta una milla y media” [71]. Kircher, en cambio, en su tratado *Musurgia Universalis* describió “una enorme bocina enroscada (cocleato) instalada a través de la pared exterior de un edificio con el doble propósito de transmitir y escuchar”.



LUIGI RUSSOLO

Nel Laboratorio degli Intonarumori a Milano.

UGO PIATTI

Figura 2.23: Luigi Russolo y su colaborador Ugo Piatti en el laboratorio de Intonarumori en Milán, 1913

En el campo del arte sonoro, un ejemplo característico del uso de conos radiadores es *Intonarumori*<sup>6</sup>, una familia de 27 instrumentos construidos alrededor de 1913 por el pintor y compositor futurista italiano Luigi Russolo. Los *Intonarumori* consistían en una caja de sonido paraleleépida con un parlante en forma de bocina en la parte delantera, una manivela y una palanca en la parte trasera y superior, respectivamente. La manivela hacía girar una rueda dentada que excitaba una cuerda tensada de tripa ubicada en el interior de la caja. La cuerda a su vez estaba unida a un tambor vibratorio acoplado a la bocina radiadora. Moviendo la palanca hacia delante y hacia atrás era posible modificar la tensión de la cuerda,

<sup>6</sup>Entonadores de ruido

y por lo tanto su frecuencia fundamental. En la figura 2.23 se puede ver una fotografía de los *Intonarumori* con Russolo (izquierda) y su ayudante Hugo Piatti (derecha), en su laboratorio de Milán.

Un ejemplo más actual, que explora a la manera de Kircher el uso de bocinas con el propósito de transmitir y escuchar, es la obra *Ruup* (2018), de la arquitecta Birgit Õigus. Este trabajo, que se puede ver en la fotografía de la figura 2.24, consta de una serie de megáfonos gigantes de madera ubicados en los bosques estonios que amplifican los sonidos del bosque. La obra busca explorar la concentración en la escucha de los sonidos de la naturaleza, los cuales según la propia autora son “familiares pero al mismo tiempo nuevos porque a menudo se los olvida y no se los escucha” [100]. La idea de amplificar los sonidos “que no pueden ser escuchados o son percibidos como ruidos de fondo por la mayor parte de nosotros” plantea la posibilidad de modelar el paisaje, a través de la reconfiguración de los sonidos ya presentes pero con una perspectiva ecológica. Retomaremos esta idea en el capítulo 4.3.2 cuando nos refiramos a dos obras que utilizan cristales sónicos.



Figura 2.24: Ruup, de la arquitecta Birgit Õigus

En consonancia con la idea de amplificar los sonidos ya presentes, pero explorando el uso

de tubos cilíndricos de acero de diferentes longitudes, *Resonance*<sup>37</sup> (2002), de Jeff Talman amplifica mediante estos tubos las frecuencias de resonancia extraídas y filtradas de una grabación del espacio de la galería, que se reproduce en la misma sala mediante un arreglo de parlantes multicanal (24.3 canales de sonido).

Finalmente, un ejemplo que se inspira en el cocleato, pero que usa tubos cilíndricos que se abren en una sección cónica para transmitir a distancia, es la obra *Urban Wijland* (2009), del artista Karel Van Der Eijk. En este trabajo, el artista instala un pequeño recinto en la que se pueden escuchar cuatro sonidos eólicos diferentes generados por dispositivos que se accionan con el viento. Los dispositivos se conectan a la casa a través de unas tuberías que transmiten el sonido hacia el interior del recinto. Los extremos de la tubería se abren hacia una sección cónica cuyo fin es amplificar el sonido.

---

<sup>7</sup><https://vimeo.com/83341288>

# Capítulo 3

## Emisión con parlantes y sistemas de espacialización

### 3.1. Introducción

El uso de técnicas para el control de la localización de fuentes sonoras utilizando parlantes, que tuvo su auge durante la segunda mitad del siglo XX, se basa en la combinación de tres tecnologías: micrófonos, amplificación con parlantes y medios de grabación. Estas tecnologías permitieron por primera vez desvincular el espacio del lugar, permitiendo que cualquier sonido pueda “grabarse en un espacio físico y reproducirse en otro lugar, amplificarse para llenar un espacio de una manera que no podría hacerlo acústicamente, y transmitirse instantáneamente de un lugar a otro a través del teléfono o la radio” [78, p. 24].

Anteriormente al desarrollo de los primeros parlantes eléctricos, la amplificación se lograba a través de medios mecánicos, como el uso de bocinas de fonógrafo. El fonógrafo (ver figura 3.1) fue el primer aparato capaz de reproducir sonido. Fue inventado en 1877 por Thomas Alva Edison, y consistió en un sistema de grabación mecánica analógica, en la cual las ondas sonoras son transformadas en vibraciones mecánicas mediante un transductor acústico-mecánico. Estas vibraciones mueven un estilete que labra un surco helicoidal sobre un cilindro de fonógrafo. Para reproducir el sonido se invierte el proceso <sup>1</sup>.

No fue hasta el año 1915 cuando investigadores en Magnavox desarrollaron el primer

---

<sup>1</sup><https://es.wikipedia.org/wiki/Fonógrafo>



Figura 3.1: El fonógrafo, inventado en 1877 por Alva Edison. Es el primer dispositivo capaz de reproducir sonido

prototipo de parlante comercialmente viable, que usaba un diafragma accionado electro-magnéticamente dentro de una bocina. En 1925 General Electric desarrolló el parlante cónico de radiador directo, que consistió en un cono de papel impulsado por un transductor electromagnético [2, pág. 14]. La invención del parlante, cuyo principal mecanismo de funcionamiento se basa en el principio de transducción electromagnética (la conversión de un medio físico en un medio electromagnético), permitió desacoplar el sonido de la fuente y por ende aislarlo para transformarlo en objeto de estudio. Esto permitió “la grabación, transmisión y amplificación del sonido a distancias que no son posibles acústicamente” (Ibid., p. 27).

En las décadas posteriores a 1950, las tecnologías de reproducción y grabación se volvieron más accesibles, lo que permitió que los compositores y artistas de la época comiencen a tratar el espacio como un parámetro orquestacional, al manipular los medios de grabación,

los materiales arquitectónicos y a experimentar con distintas configuraciones espaciales de parlantes para “crear entornos sonoros envolventes que involucrarían al oyente al proyectar el sonido desde diferentes alturas y direcciones, rompiendo con el modelo de proyección frontal” (Ibid., p. 29). La primera performance pública de música electroacústica que utilizó una distribución espacial de parlantes fue realizada por el compositor de música concreta Pierre Schaeffer en la Escuela Normal de París, el 18 de marzo de 1950. La misma usaba un sistema de cinco canales, ubicados dos frente a la audiencia a la izquierda y a la derecha, uno justo enfrente en el medio y otro en el techo. El programa incluyó “obras basadas en grabaciones de locomotoras de vapor en un depósito de París improvisado con sonidos de piano y orquesta”. Un ejemplo como el que acabamos de mencionar muestra no solamente la intención de utilizar materiales Extraídos del mundo circundante, sino de crear música pensando en la dimensión espacial como parámetro.

En los 20 años posteriores al estreno de esta obra se desarrollaron nuevas corrientes de música electroacústica y electrónica, que condujeron al desarrollo de proyectos a gran escala que incluían estructuras especialmente diseñadas para obras espaciales electroacústicas, y que se incluían en el programa de ferias mundiales y exposiciones. Tal es el caso de el *Pabellón Philips* (ver figura 3.2), una construcción de hormigón diseñada por los arquitectos Le Corbusier e Iannis Xenakis con motivo de la Exposición universal de Bruselas de 1958. El pabellón es una construcción asimétrica formada por 9 paraboloides hiperbólicos, que conformaban superficies curvas a partir de líneas rectas, idea inspirada en una composición de Xenakis titulada *Metástasis*. Contaba con proyección de películas y 425 parlantes en un sistema de 11 canales distribuidos en el interior de la sala. Aquí tuvo lugar el estreno de la obra *Poème électronique* del compositor Edgard Varèse, para quien la dimensión espacial de la música se podía representar en términos del “movimiento de masas sonoras, de planos cambiantes...proyectados en otros planos, moviéndose a diferentes velocidades y en diferentes ángulos...” (Varèse, Edgard)[115].

Posteriormente en 1970, el compositor Karlheinz Stockhausen, en conjunto con el arquitecto Bornemann y el ingeniero Leonhard de la empresa Elektronik (Zurich) diseñaron y construyeron el Pabellón Alemán en la Exposición Mundial de Osaka, una sala esférica equipada con un sistema multicanal de más de cincuenta parlantes estructurados en círculos concéntricos por debajo y por encima de la audiencia sentada. El Pabellón de Osaka fue la



Figura 3.2: *Pabellón Philips*, diseñado por el arquitecto Le Corbusier en colaboración con el compositor Iannis Xenakis

materialización de la idea de música espacial de Stockhausen, al posibilitar que “los sonidos vuelen libremente por el espacio. En círculos, espirales, debajo y encima de los oyentes” [7, pág. 183]. El diseño de salas especialmente diseñadas para obras espaciales electroacústicas continuó hasta la actualidad, entre las que podemos mencionar como hitos las estructuras multimedia *Polytope* (Montreal, 1966) y *Diatope* (París, 1978) de Xenakis, y las cúpulas de sonido de Leo Küpper (Küpper 1997).

Paralelamente, a partir de 1970 se fueron creando sistemas permanentes, unidades móviles u orquestas de parlantes como sistemas de reproducción para obras estéreo, o para el desarrollo de trabajos de investigación y composición que exploran diferentes técnicas de espacialización y difusión del sonido. Tal es el caso del *Acousmonium* en París [54], el *Gmebaphone 6* en Bourges [21], el *BEAST* en Birmingham [30, 24], el *ZKM Klangdom* en Karlsruhe, el *Sonic Lab* en el Sonic Arts Research Center en Belfast y el *Allosphere*, en la Universidad

de California en Santa Bárbara. En torno a la creación de estos espacios, que incluían sistemas multicanal de difusión sonora cada vez más complejos, se fueron desarrollando diversas técnicas de espacialización que apuntaban a recrear condiciones de escucha vinculados a la percepción de distancia, direccionalidad y movimiento del sonido. La monofonía (el uso de una fuente puntual) primero, y la estereofonía (dos parlantes creando una imagen sonora bidimensional virtual) después generaron importantes hitos en la música tales como *Symphonie pour un Homme Seul* (1950), de Pierre Schaeffer y Pierre Henry, *William's Mix* (1952), de John Cage, y *Gesang der Jünglinge* (1956), de Karlheinz Stockhausen.

Más tarde, a inicios de la década del 70, se comenzó a popularizar el uso de formatos multicanal, comenzando con la cuadrafonía (cuatro parlantes en las esquinas del espacio de actuación alrededor de la audiencia) en obras tales como *Sidewinder* (1970) de Morton Subotnik, *Sabelithe* (1971) y *Turenas* (1972) de John Chowning. En la década de 1980, la popularización de la tecnología digital y el desarrollo de formatos surround para cine condujo al uso de diferentes formatos multicanal usando fuentes puntuales, especialmente 5.1 o octofonía.

En este capítulo describiremos el funcionamiento básico de los sistemas de reproducción espacial de sonido más utilizados. En primer lugar nos referiremos a algunas obras que utilizan panorámico de amplitud basado en vectores (VBAP) en configuraciones de parlantes 2D y 3D, y sistemas multicanal basados en técnicas de grabación con múltiples micrófonos como Ambisonics. Luego nos concentraremos en describir las técnicas que implementan modelado de fuentes virtuales a partir de simulaciones computacionales que aplican un modelo binaural estándar de decodificación direccional y simulaciones de señales del canal auditivo, utilizando filtros digitales que implementan las funciones de transferencia relacionadas con la cabeza (HRTF). Dado que la mayoría de las técnicas utilizadas se basan en teorías perceptivas y acústicas, comenzaremos el capítulo describiendo los principales indicios utilizados por el sistema auditivo para determinar la posición de fuentes sonoras.

## 3.2. Localización de fuentes acústicas

Para detectar la ubicación de una fuente sonora el sistema auditivo evalúa información referida a la dimensión angular de la fuente y a la percepción de distancia. La localización

en fuentes en la dimensión angular se suele estudiar en el plano horizontal (azimuth) por un lado, y en el plano vertical (elevación), por otro. La figura 3.3 ilustra las coordenadas en tres dimensiones que se utilizan para determinar la posición de una fuente centradas en la cabeza del oyente: ángulo de azimuth en el plano horizontal, ángulo de elevación en el plano medio y distancia egocéntrica.

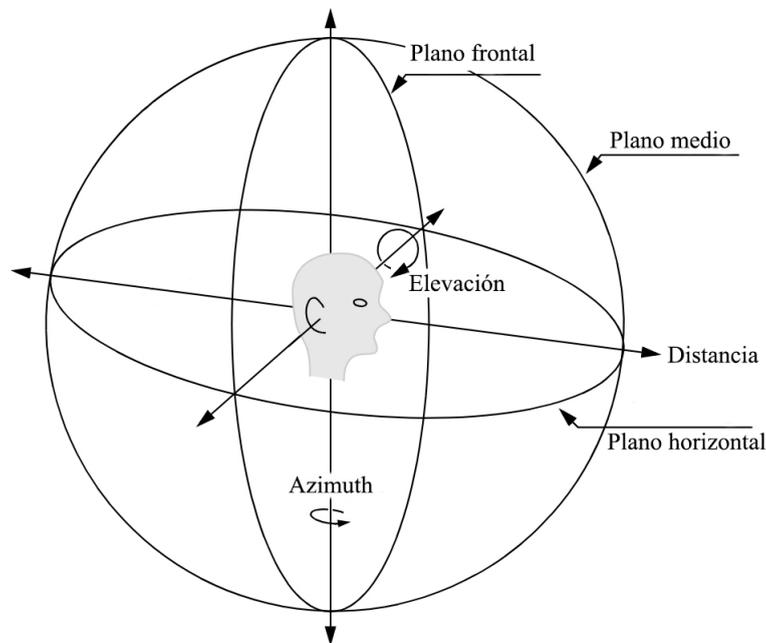


Figura 3.3: Coordenadas en tres dimensiones que se utilizan en la localización de fuentes sonoras: azimuth, elevación y distancia egocéntrica. Adaptado de Loy [81]

En el plano horizontal, los indicios más tradicionalmente estudiados son la diferencia temporal de arribo de la señal a cada uno de los oídos (ITD<sup>2</sup>), y la diferencia de intensidad entre la señal que llega a cada oído (ILD<sup>3</sup>). La ITD es producida por la diferencia de camino acústico entre la fuente y cada uno de los oídos. En cambio, la ILD, se debe al efecto de sombra acústica de la cabeza y el torso del oyente. Se ha encontrado que los mecanismos que decodifican ITD son sensibles a la fase a bajas frecuencias por debajo de aproximadamente 1,6 kHz [19]. Sin embargo, es una señal bastante estable y su valor es Casi constante con la frecuencia. Por el contrario, los mecanismos en ILD son sensibles a la diferencia de presiones en los canales auditivos y dependen en gran medida de la frecuencia: es insignificante a baja

<sup>2</sup>Del inglés *Interaural Time Difference*

<sup>3</sup>Del inglés *Interaural Level Difference*

frecuencia y aumenta en forma no monotónica con la frecuencia.

En cuanto a la localización en el plano vertical, una de las principales pistas utilizadas por el sistema auditivo son las funciones de transferencia de la cabeza (HRTF<sup>4</sup>). Las HRTF corresponden a la respuesta dependiente de la frecuencia que imparte la forma de la cabeza y la pinna (pabellón de los oídos), la cual varía con la dirección de la fuente y es diferente para cada oído. Las HRTF son las señales esenciales para la detección frente-atrás y la elevación de las fuentes de sonido, y también desempeñan un papel en la discriminación de las señales laterales. Otro mecanismo, y posiblemente el principal, para la detección frente-atrás, se refiere a la habilidad de cambiar la posición de la cabeza para minimizar la ILD y la ITD, y la diferencia entre las HRTF en cada oído. Mediante este mecanismo se logra observar si las diferencias interaurales aumentan o disminuyen para una dirección particular del movimiento de la cabeza.

En relación a la localización en distancia, uno de los principales indicios es la relación entre la energía del sonido directo y la energía del campo reverberante (D/R). Este factor implica que para un nivel de fuente dado, la intensidad del campo reverberante permanece constante, mientras que la intensidad del sonido directo disminuye al aumentar la distancia [36]. Otros factores involucrados se refieren a las variaciones en el espectro que se relacionan con la distancia de una fuente sonora. Uno de ellos es el filtrado en alta frecuencia debido a las propiedades absorbentes del aire, el cual ronda entre 3 y 4 dB cada 100 m a 4 kHz [19]. Otro factor clave corresponde al filtrado que ocurre por reflexión en las paredes del recinto, cuya proporción crece con la distancia. Finalmente, algunos estudios sugieren la posibilidad de que las claves binaurales proporcionan información para determinar tanto dirección como distancia para fuentes cercanas [29] [23]. Además de los indicios mencionados existen claves no acústicas, como las marcas visuales que tienden a atraer la localización percibida de una fuente [84], o la familiaridad con una fuente, la cual se ha demostrado que mejora la habilidad al momento de estimar la distancia [15] [4].

---

<sup>4</sup>Del inglés *Head Related Transfer Function*

### 3.3. Panorámico de amplitud

En el método de panorámico de amplitud se aplica la misma señal con diferentes amplitudes a dos (o más) parlantes equidistantes del oyente, para simular una fuente virtual cuya posición no coincide con la posición de las fuentes físicas (parlantes). El paneo por amplitud es la base de la estereofonía, que consiste en una configuración de dos parlantes en posición equidistante con respecto al oyente formando un ángulo de apertura de 60 grados. En la figura 3.4 se ilustra un arreglo óptimo de parlantes estéreo.

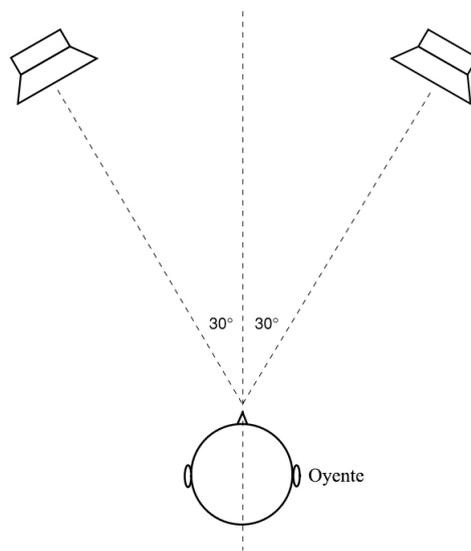


Figura 3.4: Arreglo estereofónico de parlantes. Adaptado de Rumsey [88]

La dirección estimada en azimuth con respecto al oyente puede ser estimada mediante una serie de leyes de panoramización entre las que cuentan la ley seno/coseno ideada por Blumlein [3] para estéreo (dos parlantes) y la ley tangente derivada de la ley anterior por Bennett et al [13]. Estas leyes garantizan una potencia constante a medida que las fuentes se panoramizan en diferentes combinaciones de parlantes. Como modelo general que se puede utilizar con combinaciones de parlantes en ubicaciones arbitrarias se ha propuesto el panorámico de amplitud de base vectorial (VBAP<sup>5</sup>). Este método se basa en la reformulación de la ley tangente con vectores y permite calcular factores de ganancia para configuraciones dobles o triples de parlantes [33, pág. 16]. La dirección de la fuente virtual percibida por el oyente

<sup>5</sup>Del inglés, Vector Base Amplitude Panning

depende del factor de ganancia (amplitud) aplicada a la señal de cada canal.

### 3.3.1. Configuraciones de parlantes 2D

En la configuración de parlantes 2D los parlantes se encuentran en el mismo plano que el oyente (típicamente el plano horizontal). La cuadrafonía representa un ejemplo de este tipo de configuración, en donde 4 parlantes se colocan uniformemente alrededor del oyente en ángulos de azimut de  $\pm 45$  grados y  $\pm 135$  grados. En estos sistemas se puede utilizar el método de panorámico de amplitud por pares de parlantes, en los cuales la señal se aplica a dos parlantes entre los que se encuentra la dirección de panorámica. Como la señal se aplica sólo a un parlante por vez, puede ocurrir cierta dispersión cuando la fuente se desplaza entre parlantes. Esto se soluciona aplicando la señal en al menos dos parlantes en simultáneo (como en el caso de Ambisonics), en cuyo caso la extensión direccional no depende del ángulo de panorámica. Sin embargo, la calidad direccional se degrada fuera de la mejor posición de escucha (típicamente en el medio), ya que las fuentes virtuales se localizan en el parlante más cercano que produce la señal de fuente virtual. Por ello, para obtener la menor degradación direccional posible, muchas veces es preferible utilizar el método de paneo por amplitud por pares.

#### Usos en el arte

Un ejemplo puntual para una combinación 2D de parlantes es el trabajo *Three Sounds* (1971) del artista Howard Jones. La obra explora técnicas de espacialización para indagar sobre el sonido moldeado a través del tiempo y el espacio como dimensión temporal. En *Linear Relay*, una de las tres piezas, el sonido de un metrónomo viaja en forma sucesiva en una progresión a través de 20 parlantes equidistantes. En *Area Relay*, la segunda de las piezas, el sonido se mueve en una grilla de nueve parlantes con diferentes amplitudes, de los cuales seis siempre están activos. Esto genera que el oyente no pueda identificar la posición de la fuente, en consecuencia el sonido parece “emanar de otras áreas de la habitación” [110, pág. 58]. Finalmente en *Air 44*, la tercera de las piezas, 17 parlantes dispuestos en una configuración lineal amplifican ruido blanco filtrado en distintas bandas de frecuencia. El oyente percibe estas variaciones como “un paseo a través de la escala de frecuencias”, cuya

uniformidad no varía con el tiempo que pasa sino cuando “el oyente esculpe el espacio en el tiempo” (Ibid., p. 59).

### 3.3.2. Configuraciones de parlantes 3D

A diferencia de las configuraciones 2D, en las configuraciones 3D los parlantes pueden no estar en el mismo plano del oyente. En ese caso, se utiliza la panorámica por triplete, en la cual una señal es aplicada a un máximo de tres parlantes para formar un triángulo desde el punto de vista del oyente. Si se utilizan más de tres parlantes, la configuración se divide en triángulos, uno de los cuáles se utiliza en la panorámica de una única fuente virtual a la vez. En este tipo de configuraciones suele utilizarse como método de panoramización el algoritmo SpacesNodes, inventado por Ellison en 1992, en el cual los factores de ganancia se calculan como coordenadas baricéntricas de una ubicación de fuente virtual dentro de un triángulo de parlantes [33, pág. 14]. Sin embargo, en muchos casos es deseable el uso de un método más genérico, como VBAP.

#### Usos en el arte

Un pionero en el uso de configuraciones de parlantes 3D es el artista y arquitecto vienés Bernhard Leitner, cuya obra explora la creación y transformación del espacio a través del sonido, y el rol del cuerpo en el proceso de percepción. En un manifiesto publicado en 1977, sostuvo que una “línea es una serie infinita de puntos”, y que el espacio puede ser definido a partir de ‘líneas abstractas de sonido’ [10], es decir a partir del movimiento o la circulación del sonido de un parlante a otro. Para Leitner, ‘el material de construcción es el sonido’, lo que configura una arquitectura. Además, al entender al sonido como un fenómeno temporal, sostiene que una arquitectura sonora es un espacio dinámico, que ‘se desarrolla gradualmente en el tiempo, como una secuencia constante de espacios’ (Ibid.). También se interesó por estudiar la manera en que “la intensidad, el ritmo, la velocidad del sonido en movimiento y sus variaciones interrelacionadas determinan la forma de un espacio” [41]. En *Soundcube* (1969) Leitner proyectó una sala experimental en forma de cubo con 384 parlantes distribuidos en las paredes para estudiar diferentes trayectorias de sonido en el espacio. Allí dibujó trayectorias lineales, circulares y espiraladas, en diferentes planos. La velocidad, el

pitch y la dirección de los eventos sonoros puede variar, pero sólo con el propósito de describir “el principio de los espacios creados con trayectorias de sonido”. A comienzos de la década del setenta, Leitner realizó diversos experimentos en los que investigó patrones de trayectorias lineales, circulares y espiraladas en arreglos lineales de parlantes acoplados a estructuras de vigas de madera (por ejemplo en *Wedge Space*, de 1972, o *Cylinder Space*, de 1974). En 1984 realizó *Sound Space*, una instalación ubicada en una sala del edificio principal de la Universidad Técnica de Berlín. La sala fue recubierta de paneles metálicos perforados con capas de material aislante para suavizar la reverberación del espacio. Detrás de los paneles se montaron 34 parlantes de banda ancha y 18 de alta frecuencia que amplificaban sonidos de trombones, trompetas, golpes de percusión, y sonidos guturales. Con esta obra Leitner buscaba generar diferentes configuraciones espaciales que él caracterizó como “interferencias, entrelazamientos, amasado, espacio punzante, espacio rítmico, refuerzos, espacio susurrante, paredes suaves, espacio convulsivo y circular” [25]. Leitner utilizó la sala como un instrumento para modelar formas sonoras en el espacio, ya que para él la arquitectura es un “instrumento para componer espacios-tiempo inmatrimales’ donde el sonido se transforma en el ‘material escultórico que da forma”.

Este mismo concepto fue explorado por el músico y arquitecto sonoro suizo Andres Bosshard, quien ha dedicado buena parte de su carrera al desarrollo de obras e instalaciones que utilizan sistemas de distribución de sonido multicanal para mezcla en vivo de material grabado o música. Un buen ejemplo de ello es la instalación sonora *Klangturm*, realizada para la Swiss EXPO 2002, que consistió en una torre de estructura metálica sin techo semitransparente de 40 m de altura, situada a orillas del lago Biel/Bienne, la cual se puede ver en la figura 3.5. La instalación duró 22 semanas y constó de conciertos instrumentales y sesiones de improvisación con material pregrabado y registros en vivo de “hidrófonos submarinos y datos sonificados de la actividad sísmica y solar” [40, pág. 21]. La “arquitectura sonora” constó de “40 canales de audio activos amplificados por parlantes de megafonía con subwoofers, parlantes de fabricación casera colgados de lo alto de la torre, y bocinas de alta frecuencia en globos voladores” (Ibid., p. 19). El sistema de sonido se dividió en “un anillo inferior de parlantes para el campo directo, dos conjuntos de parlantes en espiral hacia arriba y hacia abajo del eje vertical del torre, y dos anillos horizontales en niveles superiores” (Ibid.), que proyectaban sombra acústica alrededor de 50 m alrededor de la torre. Para la mezcla en vivo



Figura 3.5: La torre de sonido construida a orillas del lago Biel, en ocasión de la Swiss EXPO 2002 en la que el músico Andres Bosshard montó su instalación *Klangturm*. Fuente: Norbert Aepli. Con licencia CC-BY-2.5

y la espacialización multicanal se utilizaron dos computadoras y una interfaz de audio que corría un software de grabación en un disco duro. Para crear efectos espaciales de sonido a partir de las fuentes (instrumentales monofónicas) se empleó paneo convencional y líneas de retardo (delays) largo, corto y muy corto. Mediante el uso de delays largos generó iteraciones sucesivas de sonidos entre parlantes, mientras que el uso de delays cortos le permitió que una fuente aparezca ubicada en una posición fuera de la circunferencia real de los parlantes. Este método se basa en claves de localización por ITD y en la ley del primer frente de onda (que determina la dirección aparente de la fuente de sonido). Por su parte, el uso de delays muy cortos le permitió generar reflexiones tempranas, similar a una cámara de reverberación, con las que pudo “simular multitud de espacios exteriores cerrados o reflectantes” (Ibid., p. 20).

## 3.4. Síntesis del campo sonoro

La síntesis de campo sonoro consiste en la reconstrucción física del campo sonoro alrededor del oyente. Esto implica una representación precisa del campo sonoro independientemente de la posición del oyente y la acústica de la sala. Las dos técnicas que se suelen implementar son Ambisonics y la Síntesis de Campo de Onda (WFS<sup>6</sup>). A continuación discutiremos cada una.

### 3.4.1. Ambisonics

Ambisonics es un método de grabación, codificación, decodificación y reproducción del campo sonoro tridimensional. Como técnica de captación se basa en el uso del micrófono Soundfield, el cual consiste en cuatro cápsulas que graban cuatro señales de audio a partir de un patrón omnidireccional y tres patrones en figura de ocho orientados en los tres ejes coordenados. Las cuatro señales grabadas codifican los componentes de fase e intensidad del campo sonoro en cualquier dirección en un formato conocido como B-format, que se compone de tres componentes ortogonales en forma de ocho (X, Y y Z) y un componente omnidireccional (W). Las direcciones en el plano horizontal pueden representarse mediante combinaciones escalares y vectoriales de W, X e Y. Z corresponde a la información de altura, X es equivalente a una figura ocho orientada hacia adelante y Y es equivalente a una figura ocho orientada hacia los lados. Antes de la reproducción, las señales se codifican en un formato conocido como C-format que consiste en cuatro señales L, R, T y Q. L y R son señales compatibles con dos canales estéreo, T permite una decodificación horizontal más precisa y Q proporciona información de altura. Durante la reproducción, las señales se codifican en formato D-format y se distribuyen panoramizadas en un conjunto de parlantes que varían entre cuatro, seis u ocho colocados simétricamente en el plano horizontal alrededor del oyente. También puede utilizarse en configuraciones de parlantes 3D, por ejemplo en un arreglo cúbico de 8 parlantes o en dos hexaedros montados entre sí de 6 parlantes cada uno. Para mejorar la resolución espacial se utilizan formatos Ambisonics de orden superior, que a su vez utilizan más canales. Por ejemplo, Ambisonics de segundo orden usa 9 canales, Ambisonics de tercer orden usa 16 canales, etc.

---

<sup>6</sup>Del inglés Wave Field Synthesis

## Usos en el arte

Un ejemplo del uso de Ambisonics lo podemos encontrar en *Paesaggio Sonoro* (2011) de Marinos Koutsomichalis, una obra compuesta a partir de grabaciones ambientales in situ de varios entornos urbanos, rurales y subacuáticos, intérprete y Ambisonics. Se estrenó en 2011 en el 5º Foro de Ecología Acústica de FKL: Keep an Ear On, Florencia. Es una composición de paisaje sonoro elaborada a partir de la idea de yuxtaponer distintas grabaciones en tiempo real para, según dice el propio autor, “establecer un paisaje sonoro inmersivo dentro del cual la materialidad de los elementos dados se vuelve primordial” [94, pág. 8]. La obra utiliza técnicas de espacialización holofónica y reproducción de audio multicanal, con el fin de explorar “un conjunto de texturas envolventes muy detalladas, con el fin de estimular una experiencia auditiva profunda y multidimensional” (Ibid.). El autor intenta recrear la idea de un paseo sonoro, en el que ocurren “fenómenos perceptivos como el enmascaramiento, la escucha casual versus no casual, la escucha táctil y otros” trabajando los paisajes como texturas en yuxtaposición que se enmascaran mutuamente, para así alcanzar una “inmensa fisicalidad y una experiencia auditiva Casi táctil” (Ibid., p. 9).

Otra de las propuestas que utilizan este formato es la obra *Hidden Values* (2012), de la artista inglesa Natasha Barrett. La obra reflexiona sobre tres inventos que, según la autora, “han dado forma a nuestras sociedades y afectan nuestra vida cotidiana de muchas maneras: el paraguas, la cerradura (y la llave) y la corrección de la vista”. Compuesta en IRCAM durante una residencia de investigación, la obra utiliza técnicas avanzadas de espacialización (para ser más precisos Ambisonics de séptimo orden, aunque también existe en otros formatos) para explorar el “uso compositivo del espacio, la proyección de información cercana y lejana y la transformación entre masas sonoras, escenas sonoras y puntos espaciales precisos” [83].

Por último, cabe mencionar las obras *Abandonee* (2006-2007) y *I LAND* (2007-2009) del compositor y artista sonoro alemán Gerriet Krishna Sharma. La primera fue estrenada en CUBE, la sala de conciertos del Instituto de Música Electrónica y Acústica de Graz, y consta de una composición electroacústica espacializada mediante Ambisonics cuyo material sonoro proviene de un piano de cola destruido abandonado en un sitio de construcción en Bélgica. Las grabaciones fueron hechas con un micrófono Ambisonics Soundfield, varios acelerómetros,

transductores piezoeléctricos y micrófonos de condensador Schoeps. El “cuerpo sonoro”, es decir, el piano, que en la composición perdura como ‘objeto resonante original sólo de manera remota’ [52], conforma una presencia escultórica que según el autor, se proyecta en la sala de conciertos a través de “parlantes como un objeto maleable hecho de sonido, que el compositor puede moldear a través de procesos compositivos posteriores” (Ibid.).

En el caso de *I LAND*, la segunda obra que mencionamos aquí y que fue estrenada en CUBE (la misma sala que *Abandonee*), el compositor sigue la línea de “modelar el sonido escultural a través de la proyección de sonido controlada por computadora” [107, pág. 12]. Consiste en una composición de paisaje sonoro que profundiza el fenómeno isla, a partir de material sonoro grabado en la isla de Sylt en abril de 2008, durante la estancia del compositor en ese lugar. Las tomas consistieron en sonidos de barcos, boyas, vibraciones de edificios, sonidos subacuáticos, flujo y reflujo de marismas, y viento, entre otros, que luego fueron “cortados, filtrados y mezclados en nuevos sonidos con fuertes asociaciones” [72, pág. 12], algunos de ellos produciendo acordes y secuencias percusivas. En CUBE, el montaje de la sala consistió en un grupo de 48 parlantes en el techo, distribuidos en 6 grupos (“para superponer y colorear el sonido en la habitación”), y 8 fuentes discretas dispuestas en espiral como contraste con el “ambiente” ambisónico. Llevado a la sala, el material sonoro espacializado en formato Ambisonics forma estructuras sonora tridimensionales como bloques cuyas coordenadas se convierten en “cuerpos de sonido a través del movimiento, el entrelazamiento y la compresión” (Ibid.). Según el compositor, estos cuerpos pueden configurar áreas o atmósferas sonoras que pueden moldearse y dejar una impresión tridimensional en la percepción. Es interesante el uso que el compositor hace del formato Ambisonics para crear forma. Por ejemplo, puede definir formas delimitables espacialmente a partir de sonidos pulsantes que se mueven entre varias fuentes vecinas. O puede asignarse un mismo sonido a diferentes fuentes en arreglo circular y alejar esas fuentes como un canon, lo que le da al círculo “una tercera dimensión, es decir, la superficie se convierte en un cuerpo” (Ibid.). También describe el uso de curvas de volumen y velocidades, para crear “masas de sonido que se mueven a diferentes velocidades hacia una ubicación específica” (Ibid.).

### 3.4.2. Wave Field Synthesis

Wave Field Synthesis (WFS) o síntesis de campo de onda, es una técnica que reconstruye el campo sonoro completo (es decir, en sus condiciones acústicas naturales, incluyendo la generación de reflexiones y reverberaciones tempranas) captado en la sala de grabación en una sala de escucha. La figura 3.6 ilustra la implementación de WFS, donde los frentes de onda emitidos por una fuente  $F$  en el escenario son grabados por micrófonos directivos. A continuación, un procesador matricial  $W$  los extrapola electrónicamente fuera del escenario y finalmente se vuelven a emitir en la sala mediante un arreglo de parlantes. De esta manera permite sintetizar físicamente los frentes de onda en cualquier punto de escucha [16].

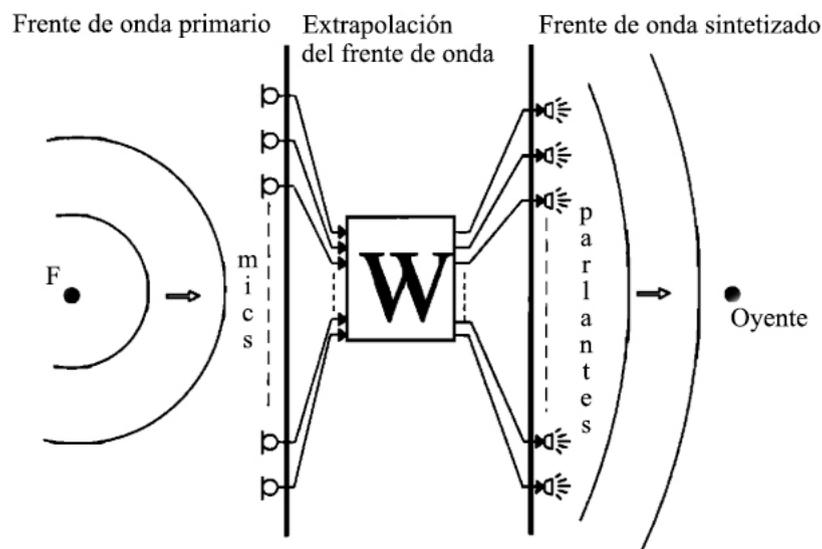


Figura 3.6: Ilustración de la implementación de WFS, donde  $F$  es la fuente, y  $W$  es el procesador matricial que extrapola el campo de ondas antes de la emisión. Adaptado de Berkhout et al. [16]

WFS se basa en el *principio de Huygens*, que establece que cualquier punto de un frente de onda puede considerarse como una fuente secundaria. Teóricamente es superior como técnica, pero debido a que el sistema reproduce el campo sonoro con precisión sólo si los parlantes están a media longitud de onda de distancia máxima, para reproducir correctamente altas frecuencias es necesario utilizar gran cantidad de parlantes. WFS se ha construido utilizando aproximadamente 100 parlantes, alcanzando una reproducción espacial precisa a unos 1000 Hz [33, pág. 15].

### Usos en el arte

Un ejemplo de obra sonora que emplea WFS es *512 Voices*, para Soprano y 496 canales de WFS. La obra, realizada en 2008 por el curador, compositor y artista sonoro neoyorquino Zach Layton con la soprano Amelia Watkins, consiste en una composición coral que utiliza una matriz de parlantes de WFS de 496 canales discretos. El sistema, actualmente en desarrollo en el Experimental Media and Performing Arts Center (EMPAC) en Troy, NY, permite de manera novedosa integrar un rango de frecuencia más alto en el campo de ondas (hasta 6 kHz), debido al tamaño muy pequeño de los parlantes y su gran proximidad (5 centímetros de distancia) [105]. Además es modular, permitiendo que los parlantes estén divididos en 16 cajas que se pueden configurar de varias formas y se pueden instalar y desmontar rápidamente. El estreno de la obra en la sala de EMPAC contó con voz en vivo, 496 canales de voz procesada y sonido electrónico especializado. El libreto de la pieza se extrae íntegramente de los nombres latinos de las nubes, creando un grupo de fonemas migratorios que se desplazan por el terreno sónico como el clima [112].

Otro ejemplo sonoro es la obra *Aubaine* (2005) de Gerriet Sharma, compuesta en el estudio de WFS del Instituto Fraunhofer en Illmenau. La obra se compuso en colaboración con el ensamble de arte sonoro Nook, del que también es parte integrante el compositor. El material sonoro de la obra consta de sonidos abstractos, desarrollados y procesados por Nook. La configuración del estudio consistió en paneles con aproximadamente 200 parlantes en posición horizontal. EL objetivo del compositor a través de esta obra es disponer y componer el material sonoro en “formaciones sonoras tridimensionales” [107, pág. 11], utilizando entornos de parlantes en WFS. Es decir, transformar el material en cuerpos u objetos sonoros maleables y localizables. Por esto mismo, y tal cual dice el compositor, entra en juego el trabajo con “la percepción del movimiento, la distancia y la perspectiva” [53]. Para ello se vale de recursos como “el reconocimiento de patrones, duraciones y difuminación de la definición espacial” (Ibid.).

Por último cabe mencionar *HörSaal*, una instalación realizada en 2010 en la sala de conferencias H104 de la Universidad Técnica de Berlín, la cual se muestra en la figura 3.7. La obra utiliza la tecnología de síntesis de campo de onda (WFS) utilizando un sistema de reproducción de audio de 832 canales instalados. Como explicamos anteriormente, la tec-



Figura 3.7: Sala de conferencias H104, Universidad Técnica de Berlín

nología WFS permite el posicionamiento espacial aleatorio del campo sonoro de una fuente de sonido. Leitner concibió la sala como un instrumento para la “composición de espacios sonoros dinámicos y estáticos’ mediante la ‘superposición de estructuras de movimiento variables en el espacio”. Para la composición de las estructuras estáticas utilizó el habla como material sonoro, mientras que para las dinámicas utilizó crujidos y susurros con eco, que se escuchaban en 10 sitios abstractos indicados con duelas rojas de 2 m de alto. Leitner calificó estos espacios de audición como “aleatorios”, pero a la vez como una “composición exacta, controlada”.

### 3.5. Reproducción Binaural

El audio binaural parte de la premisa de que se posible reproducir el campo sonoro de manera fiel si los oídos del oyente reciben una señal lo más parecida a la que habrían experimentado durante la escucha natural. El método más común de síntesis binaural consiste en grabar el campo sonoro utilizando micrófonos binaurales insertados en los oídos de una cabeza de maniquí (*dummy-head*), y reproducir estas señales a través de auriculares en los

oídos de un oyente, como se ilustra en la figura 3.8. A partir de las señales generadas se derivan por un lado las diferencias temporales (ITD) y espectrales (ILD) de las señales del canal auditivo, y por otro, las funciones de transferencia de la cabeza (HRTF). A los fines de simular la localización de las fuentes de sonido, las HRTF se almacenan y procesan como respuestas a impulso (que contienen el sonido directo, seguido de una serie de reflexiones tempranas y la reverberación tardía), las cuales se aplican a la señal de cada oído como filtros de convolución de respuesta a impulso finitos (FIR<sup>7</sup>).

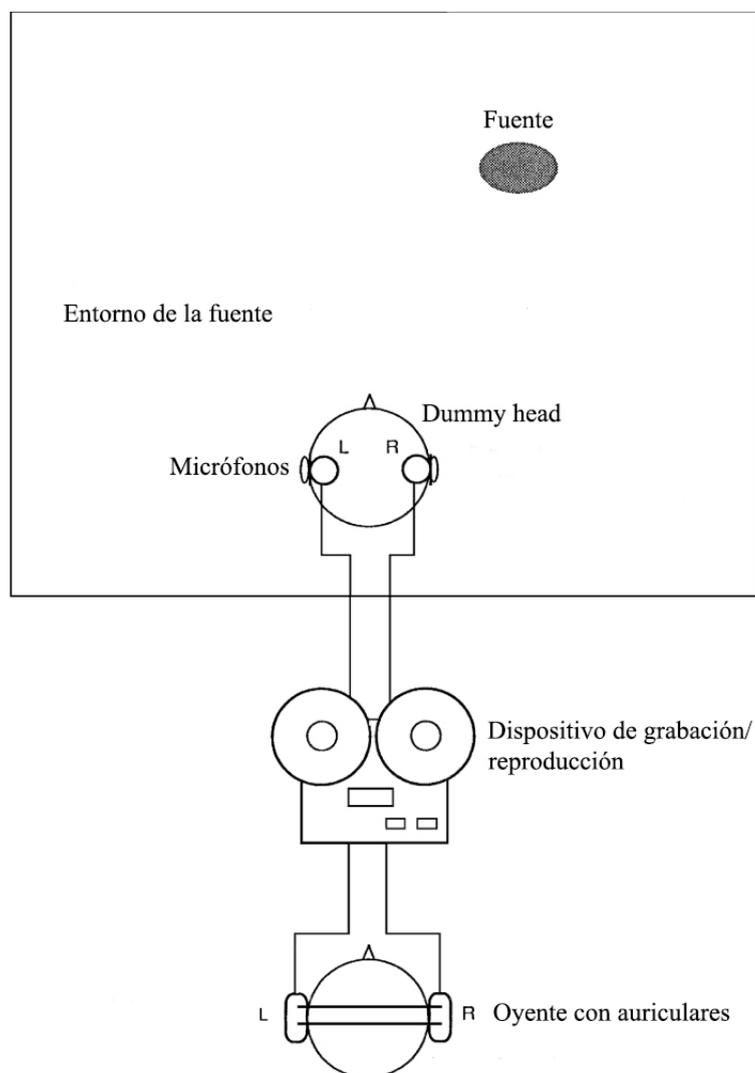


Figura 3.8: Configuración básica de grabación y reproducción binaural. Adaptado de Rumsey [88]

<sup>7</sup>Del inglés Finite Impulse Response

Además de utilizar la cabeza de maniquí, existen otros métodos comunes para generar HRTFs, por ejemplo, obteniendo HRTFs a partir de mediciones en un oyente individual (individualizadas), como un promedio de las HRTFs individualizadas (generalizadas), o mediante cálculos numéricos a partir de un modelo matemático (por síntesis). Si bien para la mayoría de las situaciones se utilizan las HRTF generalizadas, puede ocurrir un desajuste entre las señales ILD y ITD con respecto a las HRTFs individualizadas, e incluso suelen ocurrir diferencias que suelen ser significativas a alta frecuencia [26, pág. 171]. En la práctica estos sistemas están pensados para ser escuchados con auriculares, pero existen implementaciones para que puedan escucharse con parlantes. Cuando el audio binaural se escucha con parlantes, existe cierto grado de diafonía (*crosstalk*) entre las señales de ambos oídos, debido a que tanto el oído derecho como el izquierdo escuchan simultáneamente señales del canal derecho como del izquierdo. Para solucionar este problema, se suele implementar una técnica que se conoce como cancelación de diafonía interaural<sup>8</sup>, donde se emite una señal de cancelación para la diafonía del oído izquierdo desde el parlante derecho y viceversa. Este método suele funcionar mejor en áreas de trabajo pequeñas, y no es fácilmente aplicable en una sala de conciertos (Ibid., p. 172).

### Usos en el arte

Dos ejemplos sonoros de escucha binaural con auriculares son *Münster Walk* (1997) y *Conspiracy Theory* (2002), de los artistas canadienses Janet Cardiff and George Bures Miller. *Münster Walk*<sup>9</sup> consta de una caminata de audio guiado con accesorios de medios mixtos compuesta de 17 minutos de voces, sonidos y ruidos (el canto de los pájaros, el repique de campanas y ruido de la calle) grabados con una cabeza binaural en los alrededores del Museo Estatal de Arte e Historia Cultural de Westfalia en la ciudad de Münster, Alemania. Los artistas crearon para el visitante de la exposición un recorrido individual en Walkman por una ruta específica en el centro de la ciudad, en el que se mezclaban los sonidos específicos del sitio con los sonidos generados sintéticamente. Estos sonidos se complementaban con “elementos narrativos, como informes y pensamientos sobre escenarios locales, así como historias de crímenes y otros elementos ficticios” [20], en los que los propios oyentes parecían

---

<sup>8</sup>*Interaural crosstalk cancelation*

<sup>9</sup><https://cardiffmiller.com/walks/munster-walk/>

estar involucrados.

En *Conspiracy Theory*<sup>10</sup>, otra audio guía realizada en francés y en inglés para el Museo de Arte Contemporáneo de Montreal, Cardiff y Miller guían al espectador por un sendero que comienza en el segundo piso del museo y continúa hasta el primer piso hacia una de las entradas del museo, utilizando sonidos (pasos, sonidos de eco indistinto en la arquitectura, un teléfono celular sonando, una banda de jazz en vivo y un cantante, el sonido de una puerta de metal pesado cerrándose) que narran la historia de una mujer que dice que mató a un hombre. Tanto en *Münster Walk* como en *Conspiracy Theory*, Cardiff y Miller propusieron concebir los paseos como una escultura, al utilizar la grabación de sonido binaural como una herramienta para crear arquitecturas sonoras. Como sugiere Merrilee Wolsey, estas obras invitan al participante a “mirar y escuchar la arquitectura del museo y más allá” [114, pág. 57].

Esta misma idea, pero orientada a explorar el interior de la cabeza del oyente, aparece en *Headscapes* (2003), de Bernhard Leitner [42]. *Headscapes* es una obra diseñada especialmente para escucharse sólo con auriculares y consiste en una serie de grabaciones binaurales que buscan construir “formas de sonido como esculturas que los oyentes percibirían como colocadas dentro de los límites de sus propias cabezas”. Para ello, el artista imagina la cabeza como un “receptáculo en forma de globo para espacios acústico-geométricos basados en el tiempo” en el que los sonidos (electrónicos sintéticos, golpes rítmicos) pueden moverse de un punto a otro, trazar líneas sólidas y escalonadas y extenderse con el tiempo de una superficie a otra. En esta obra, Leitner vuelve sobre la idea de configurar espacio a partir del sonido, pero esta vez vinculada al rol del propio cuerpo en la percepción, utilizando la cabeza como espacio arquitectónico que tiene dimensiones particulares, cualidades reflectantes y resonancias, y que además constituye un espacio limitado, finito.

Por último, cabe mencionar la obra *Making Tracks Feat: Linkage* (2006), del artista sonoro británico Dallas Simpson. Consiste en una pieza conceptual enmarcada en un contexto de intervención alrededor de una línea de tren llamada la North Yorkshire Moors Railway en el Reino Unido. El material sonoro está conformado por grabaciones binaurales de los sonidos mecánicos del tren (entre los cuales el autor destaca los intercambiadores de vía) e interacciones sociales producidas en los vagones del tren durante el recorrido de 18 millas de

---

<sup>10</sup><https://cardiffmiller.com/walks/conspiracy-theory-theorie-du-complot/>

la línea, tomadas desde la perspectiva de un pasajero regular. En esta obra, el autor explora la materialidad intrínseca del tren partiendo del sonido distintivo de los intercambiadores, que dependen del sistema de ruedas y ballestas, los cuales tienen su propia “marca sonora específica”. El autor juega e improvisa con el material sonoro ferroviario captado con microfónia binaural, cuyo uso queda justificado en un intento por “desvelar durante el trayecto distintas perspectivas y espacializaciones así como juegos de paneos de izquierda a derecha y viceversa” [89].

# Capítulo 4

## Propagación y proyección del sonido en entornos acústicos

### 4.1. Introducción

Cuando una onda se propaga pueden ocurrir perturbaciones ocasionadas por variaciones en la densidad y la elasticidad del medio. Si las variaciones son graduales, usualmente ocurren alteraciones en la velocidad y dirección de propagación de la onda, fenómeno que se conoce como refracción. En cambio, si las variaciones son más abruptas (por ejemplo el choque de una onda contra un muro), la mayor parte de la energía se refleja o se dispersa y otra parte menos significativa se transmite en el objeto o a través de él. La figura 4.1 ilustra el choque de una onda contra un obstáculo, donde parte del sonido se refleja, parte se transmite y el resto se absorbe.

Consideremos primero el caso de una onda plana que incide sobre una superficie llana reflectante. La ley de reflexión formula que el ángulo del rayo incidente  $\theta_i$  y el rayo reflejado  $\theta_r$  se encuentran en el mismo plano y los ángulos de incidencia y reflexión son iguales:

$$\theta_r = \theta_i \tag{4.1}$$

Si la superficie reflectante es lisa y plana se genera una reflexión especular que crea una fuente fantasma equidistante a la perpendicular de la superficie reflectante. En cambio, si la superficie es difusa, la reflexión no especular genera dispersión y no se crea ninguna fuente

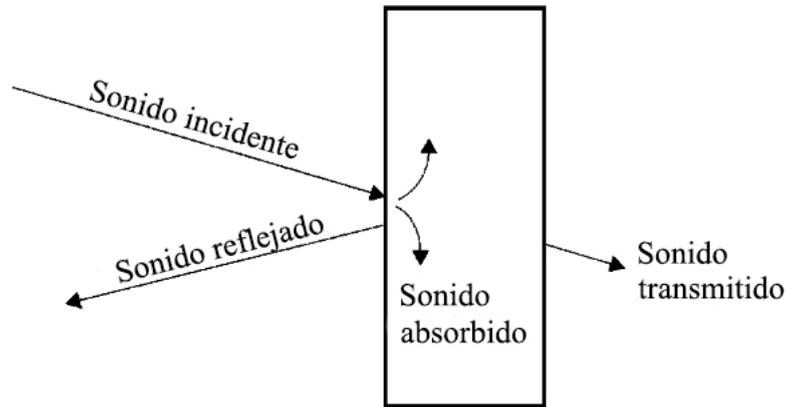


Figura 4.1: El sonido incidente se refleja parcialmente, se transmite parcialmente y se absorbe parcialmente. Adaptado de Watkinson [90]

fantasma. Por otra parte, si el objeto es pequeño en comparación con la longitud de onda, el frente de onda experimentará dispersión. En cambio, si las dimensiones del objeto son mayores a la longitud de onda, el frente de onda experimentará reflexión. La dispersión de ondas alrededor de los bordes de un obstáculo o a través de una apertura en una región de sombra geométrica detrás del obstáculo se conoce como *difracción*. Este fenómeno ocurre cuando el frente de onda se propaga a través de pequeñas aberturas u obstáculos o al pasar por bordes afilados, y sigue el *principio de Huygens* (1629-1695). Este principio, basado en la formalización matemática de las ecuaciones de Fresnel (1788-1827) y Kirchoff (1824- 1887), sostiene que cada punto del frente de onda se comporta como una fuente esférica y que la suma de estas ondas secundarias es el nuevo frente de onda. Esto quiere decir que el objeto difractante o apertura actúa como una fuente secundaria de la onda de propagación. Este concepto se ilustra en la figura, 4.2, donde se observa la difracción de una onda plana en el agua al atravesar aberturas de diferentes tamaños. A medida que la abertura se vuelve más pequeña la cantidad de energía que pasa a través de ella disminuye, pero la difracción crece porque la energía se distribuye más uniformemente. En cambio, cuanto más grande es la abertura más energía tiende a emitirse. La cantidad de difracción es proporcional a la longitud de onda, es decir que las frecuencias bajas tienden a difractar y las frecuencias altas tienden a emitir.

La creación de imágenes de dos o más fuentes coherentes procedentes de una reflexión o

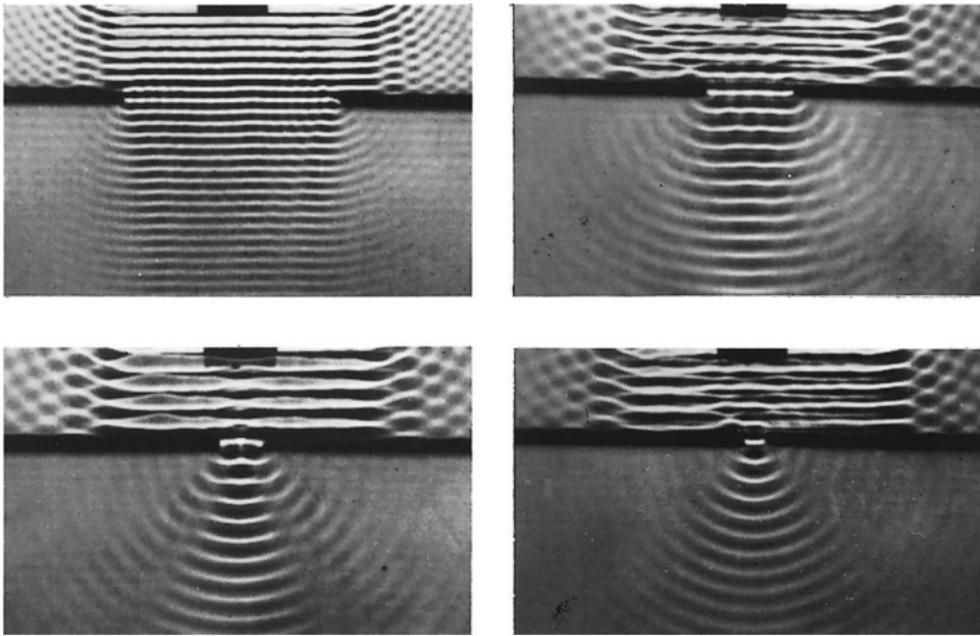


Figura 4.2: Difracción de ondas de agua que pasan a través de aberturas de varios tamaños. Cuanto más estrecha sea la abertura (en comparación con la longitud de onda), mayor será la difracción. Extraído de Rossing et al. [11]

difracción genera las condiciones para la interferencia por superposición de patrones de onda idénticos. La coincidencia en los lugares de compresión de las ondas superpuestas conducen a una mayor compresión y la coincidencia en las zonas de rarefacción conducen a una mayor rarefacción. Estos son lugares indicados como interferencias constructivas, donde la amplitud se duplica. En cambio, la coincidencia de rarefacciones y compresiones se cancelan entre sí, produciendo interferencias destructivas donde la amplitud se acerca a cero. El efecto más importante de la interferencia es la formación de *ondas estacionarias*, las cuales, como veremos más adelante, se producen por reflexión en las paredes de un recinto cerrado (ver figura 4.3).

Ahora analicemos la reflexión y la transmisión en el límite de separación entre dos medios con diferentes velocidades de propagación. Si  $c_1$  es la velocidad de propagación del medio 1 y  $c_2$  es la velocidad de propagación del medio 2, asumiendo que la fuente irradia en el medio 1 y la frecuencia se mantiene constante en ambos medios, el coeficiente de amplitud de la

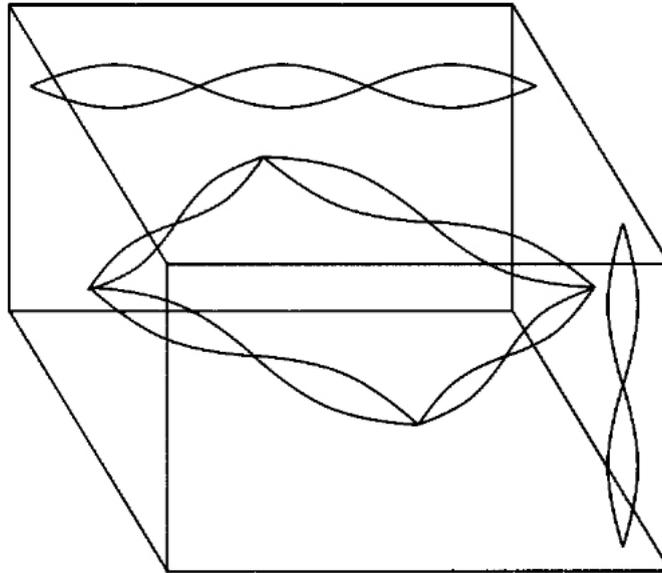


Figura 4.3: Formación de ondas estacionarias en un recinto cerrado. Adaptado de Watkinson [90]

onda reflejada  $A_r$  será

$$A_r = \frac{c_2 - c_1}{c_1 + c_2} \quad (4.2)$$

El coeficiente de amplitud de la onda transmitida  $A_t$  será

$$A_t = \frac{2c_2}{c_1 + c_2} \quad (4.3)$$

La parte de la energía sonora que se transmite está sujeta a la ley de óptica geométrica de Snell, que gobierna el fenómeno de *refracción*. La refracción es el cambio de dirección de propagación que experimenta una onda cuando atraviesa la superficie de separación entre dos medios con distintos índices de refracción. El índice de refracción es una medida de cuánto se reduce la velocidad de propagación dentro del nuevo medio. La ley de Snell será tratada con mayor detalle en el capítulo 4.3.2.

## 4.2. Propagación en salas

En este capítulo nos interesa discutir la idea del espacio como resonador, es decir, la forma en que el espacio arquitectónico puede funcionar como un instrumento acústico. Esta idea se vincula con la resonancia simpática que surge entre el volumen de un espacio y la arquitectura misma, es decir la relación entre la geometría y la densidad de los materiales, el volumen de ese espacio y las características de los sonidos que allí se proyectan. La manifestación física de estos fenómenos es la vibración simpática que ocurre por la generación de ondas estacionarias, tanto en la estructura como en el aire. La vibración simpática ocurre cuando la frecuencia del estímulo se aproxima a la frecuencia natural de vibración o frecuencia de resonancia propia de un sistema acústico o cavidad de aire [87, pág. 403]. De manera similar a un instrumento, un espacio dado responde a un estímulo sonoro mediante la vibración forzada de sus frecuencias naturales de resonancia (o armónicos), que surgen debido a la formación de patrones de ondas estacionarias generadas por las reflexiones en las paredes. Uno de los primeros en estudiar la formación de patrones de onda estacionaria fue el físico y músico Ernst Chladni, quien condujo una serie de experimentos [1] para hacer visibles los modos de propagación de las ondas y el fenómeno de la resonancia. Chladni roció una fina capa de polvo sobre placas metálicas fijadas mediante un eje central, y luego las hizo vibrar con un arco de violín. El polvo se asentó en las zonas de vibración nula (nodos), dejando entrever los patrones de onda estacionaria generados por la frecuencia natural de la placa, denominados *figuras de Chladni*. En la figura 4.4 se pueden ver las figuras dibujadas sobre las placas metálicas. El experimento de Chladni es perfectamente aplicable a la descripción de cualquier fenómeno que involucre la formación de patrones de interferencia de ondas estacionarias, ya sea en un sólido o en el aire. En este capítulo queremos estudiar en particular la formación de ondas estacionarias en el aire asociada a la interferencia por reflexión en las paredes de un recinto cerrado, y a la vibración de estructuras por transmisión resonante.

### 4.2.1. Ondas estacionarias en el aire

La formación de ondas estacionarias es un efecto asociado a la interferencia y ocurre debido a la reflexión en las paredes de un recinto cerrado. La superposición de la onda reflejada con la onda incidente, genera patrones de interferencia constructivos y destructivos caracterizados



Figura 4.4: Figuras de Chladni sobre placas metálicas. Fuente: Matemateca (IME/USP)/Rodrigo Tetsuo Argenton. Con licencia CC-BY-SA 4.0

por puntos donde la presión es mínima (nodos) y otros donde la presión es máxima (vientres). El comportamiento de una onda estacionaria puede ser descrito como la suma de dos ondas de igual frecuencia que viajan en sentidos opuestos, es decir

$$y_1(x, t) + y_2(x, t) = A_1 \sin(kx + 2\pi ft) + y_2(x, t) = A_2 \sin(kx - 2\pi ft) \quad (4.4)$$

siendo  $k = 2\pi/\gamma$ . Asumiendo que  $A_1 = A_2 = A$ , entonces

$$y_1(x, t) + y_2(x, t) = 2A \cos(kx) \cdot \sin(2\pi ft) \quad (4.5)$$

Los nodos, es decir los puntos donde la presión es nula ocurren en

$$x_n = (2n - 1)\gamma/4, (n = 1, 2, 3..) \quad (4.6)$$

y los máximos (vientres) ocurren en

$$x_n = n\gamma/2, (n = 1, 2, 3..) \quad (4.7)$$

Las ondas estacionarias que se forman entre paredes paralelas opuestas se denominan modos propios. Si  $L$  es el tamaño de la sala, las frecuencias de los modos propios se relacionan

a longitudes de onda  $\gamma = 2L/n$  ( $n = 1, 2, 3..$ ), y por lo tanto se calculan como

$$f_n = c/\gamma = (c/2L) \cdot n \quad (4.8)$$

### Usos en el arte

Una idea muy explorada por diversos artistas sonoros consiste en utilizar ondas estacionarias para amplificar una resonancia o generar sombra acústica por interferencia destructiva, para generar variaciones de amplitud que a un nivel suficiente se vuelven perceptibles físicamente. Mediante esta técnica los artistas buscan generar una presencia escultural del sonido representada a nivel de sensación física, como un objeto tangible modelado en el espacio. A diferencia de las obras anteriores que consideraban al sonido como un fenómeno ligado a la vibración del material, estas prácticas lo consideran un material en sí, que crea forma mientras se propaga en el aire y cuyos límites coinciden con los del propio espacio donde se manifiesta.

Uno de los principales referentes de esta práctica es el artista californiano Michael Brewster, quien trabaja desde 1970 en un conjunto de obras que él denomina como *Acoustic Sculptures*. En las obras de este estilo Brewster crea campos de ondas estacionarias a través del uso de resonancias específicas de la sala. Un ejemplo concreto es *See Hear Now* (Los Angeles Contemporary Exhibitions, 2001), que consiste en una muestra formada por seis instalaciones de aproximadamente 4 m de ancho por 8 m de largo por 4 de alto en las que Brewster amplifica una serie de tonos puros modulados cuya dinámica crea “presencia material a través del fenómeno de ondas estacionarias” [51, p. 169]. De esta manera hay un juego de reciprocidad entre el espacio y el sonido, en el que la arquitectura opera “para ayudar literalmente en la construcción de la obra escultórica, multiplicando la presencia volumétrica de sus rasgos” (Ibid.). Tanto en *See Hear Now* como en la mayoría de sus obras, Brewster disuelve el espacio entre la obra y espectador y crea entornos inmersivos en los que el sonido se torna un cuasi-objeto con dimensión táctil, o como dice Brewster “una cosa espacial que puedes habitar” [28]. El oyente experimenta fluctuaciones de amplitud, lo que le da la “experiencia de entrar y salir de los focos de sonido, muy parecido a moverse a través de áreas de temperaturas variables” [108].

Otro artista que trabaja de forma recurrente con resonancias y ondas estacionarias es Paul

Bavister, arquitecto y académico de profesión, e integrante del colectivo Audialsense, junto al cual realizó la obra *Turbine Hall Frequencies* (2007), una instalación en la sala de turbinas de la Tate Modern en Bankside, Londres. Allí realizó una serie de intervenciones que exploraban los efectos espaciales del “sonido puro” en una sala de gran volumen, efectos que podrían experimentarse audible y físicamente debido a los grandes diferenciales de presión inherentes a las ondas estacionarias. El proyecto giraba en torno a la idea de interactuar con un “paisaje invisible de diferentes densidades de aire y hacerlo visible” [66, pág. 103], es decir visualizar la forma del sonido. Para ello tomaron las dimensiones de la sala (152 metros de largo por 30 metros de alto por 24 metros de ancho) y generaron ondas estacionarias calculando los modos de la misma, cuyas frecuencias de resonancia fueron estimadas en 2,2 Hz, 11,3 Hz y 14,1 Hz. Esas frecuencias formaban un acorde que era modulado por dos tonos sinusoidales que variaban en frecuencia en el rango de la voz humana, lo que provocaba “interferencias y latidos (pulsos rítmicos de sonido)” (Ibid.). Por último se midieron los modos propios de la sala utilizando una grabadora digital, y se visualizaron en un software de análisis espectral, lo que reveló las fluctuaciones de presión sonora como “un paisaje que se opone dramáticamente a la naturaleza lineal regular de la arquitectura” (Ibid.).

Además de los ejemplos mencionados, otros artistas han contribuido al trabajo con ondas estacionarias. Por ejemplo en su pieza del Museo de Arte de La Jolla a finales de 1969, Michael Asher combinó materiales absorbentes y reflectantes para explorar la capacidad de “modelar la presencia concreta a través de estructuras audibles” [51, p. 89], cuestionando la idea del sonido como objeto de arte en sí mismo. Para ello acondicionó una sala de siete por nueve metros con paredes de yeso y dos placas de aluminio para crear un espacio acústico altamente reflectante y colocó material absorbente en el piso. Luego amplificó una única frecuencia de 85 hz, lo que provocó que “las superficies verticales resonaran como si estuvieran sintonizadas, mientras que las superficies horizontales, debido a su efecto de amortiguación del sonido, redujeron la frecuencia’ [12]. De esta manera, la intensidad sonora se gradúa conforme el visitante se acerca al punto central de la sala, donde las ondas se cancelan y el sonido se vuelve inaudible. Al igual que *Turbine Hall Frequencies* de Bavister, aparece la idea de modelar el sonido mediante la creación de patrones de interferencia constructiva y destructiva de ondas, que son propiciadas por el uso de material absorbente y reflectante.

Otro ejemplo característico del uso de la sala como resonador es la instalación *No. 1 for*

*High and Low Frequencies* (2014) de John Wynne, expuesta en la Rochelle School Gallery de Londres. La obra utiliza dos subwoofers en cada extremo de la sala y 2 tweeters de alta calidad colocados en diagonal en el espacio. Para dar lugar a los sonidos del exterior, el artista utiliza frecuencias graves y agudas extremas, que a su vez generan resonancias en el techo y batimientos que afectan físicamente al visitante. Como dice Wynne, “quería hacer que las paredes fueran translúcidas acústicamente y llamar la atención sobre la forma en que los sonidos del exterior se ven afectados por la acústica arquitectónica del espacio” [82].

Otro enfoque sobre el uso de resonancias se vincula al trabajo con la correspondencia entre el volumen de un espacio dado y la frecuencia del sonido. La particularidad de estas obras es que incorporan la sala en la obra, como si fuera la caja de resonancia de un instrumento. Por ejemplo, en *Cromatico* (2011), una escultura de Lukas Kühne emplazada en la localidad de Tallin, Estonia, 12 cámaras de hormigón resuenan en los tonos de la escala cromática, creando una sensación visual de cada nota, lo que permite “comprender mejor el espacio en relación con las frecuencias contenidas en sus volúmenes” [80]. El mismo concepto es explorado en *Tvisongur* (2012) una escultura localizada en Seydisfjordur, Islandia. *Tvisongur* se muestra en la figura 4.5, y consta de cinco domos interconectados de concreto que amplifican los tonos de un sistema armónico tradicional de la música de Islandia.



Figura 4.5: Tvisongur, de Lukas Kühne

Otro ejemplo es la serie de instalaciones *Long String Installations* (desde 1974) y *String Installations* (desde 1980) de Paul Panhuysen y Johan Goedhart, que utilizaban largas cuerdas de acero acopladas a diferentes puntos de la sala. Las cuerdas eran activadas manualmente, a través del frotamiento, la percusión y el raspado, o de forma automática, a través de electroimanes y motores. En algunas de estas instalaciones se llegó a unir las cuerdas a instrumentos musicales como pianos, que se amplificaban a través de pastillas de guitarra eléctrica, micrófonos electret o piezoeléctricos. En estos ejemplos se repite la idea de buscar una correspondencia entre el sonido y la sala, dado que la frecuencia de vibración de la cuerda depende de su longitud, que a su vez está adaptada a la geometría de la sala. A su vez esta actúa como un recinto resonante secundario de las cuerdas, lo que también contribuye a modelar el timbre del sonido.

#### 4.2.2. Transmisión resonante en estructuras

Este capítulo trata sobre la interacción de ondas estructurales y sonoras. Una estructura finita siempre propicia la existencia de frecuencias naturales y sus modos asociados. Cuando una estructura es excitada por una fuerza de banda ancha se produce la excitación resonante de numerosos modos estructurales. En la práctica, cuando las estructuras son excitadas mecánicamente por alguna fuerza de banda ancha, se excitan muchas frecuencias naturales que resuenan con la fuerza aplicada. En cambio, en las estructuras excitadas acústicamente (es decir, ondas sonoras incidentes), la respuesta se debe a dos mecanismos, por un lado a una vibración *forzada* en la frecuencia de excitación, y por otro a una vibración debida a la excitación de *modos estructurales*. El primer mecanismo se asocia a una onda propagándose a través de la estructura, y el segundo a una onda que interactúa con los bordes de la estructura. Como la respuesta estructural es resonante y forzada, la transmisión a través de la estructura se debe a uno o a ambos mecanismos.

Las frecuencias naturales asociadas con los modos de vibración de estructuras tipo plataforma finita simplemente apoyada, con lados  $L_x$  y  $L_y$  están dadas por

$$f_{m,n} = \frac{1,8c_L t}{\lambda_{m,n}^2} \quad (4.9)$$

donde  $\lambda_{m,n}^2$  es la longitud de onda característica del modo, y

$$\frac{1}{\lambda_{m,n}^2} = \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_y^2} \quad (4.10)$$

con  $L_x = m\lambda_x/2$  y  $L_y = n\lambda_y/2$ .

El número de onda bidimensional de un modo de vibración está dado por

$$k_{m,n} = \frac{2\pi}{\lambda_{m,n}} = \left\{ \left( \frac{m\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L_y} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

donde

$$k_x = \frac{m\pi}{L_x}, \text{ y } k_y = \frac{n\pi}{L_y} \quad (4.12)$$

Cada modo de vibración puede ser representado por un punto en el espacio de frecuencias, y es posible tener varios modos de vibración en cualquier frecuencia (ver figura 4.6). Las resonancias a cualquier frecuencia son los puntos en el espacio de frecuencias donde el número de onda modal  $k_{m,n}$  es *igual* al número de onda de flexión  $k_b$ , asociada a la fuerza aplicada. Para una determinada banda de excitación  $\Delta\omega$ , los modos resonantes son los modos que caen dentro de los dos vectores de onda que definen las frecuencias  $\omega$  y  $\omega + \Delta\omega$  (los modos resonantes que aparecen en la región sombreada que se muestra en la figura 4.6).

El radio de un arco que define un vector de número de onda está dado por

$$r_B = k_B = k_{m,n} = \frac{2\pi}{\lambda_{m,n}} = 2\pi \left( \frac{f_{m,n}}{1,8c_L t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

En relación a una placa forzada a vibrar en una frecuencia particular, su respuesta es la superposición de todos sus modos impulsados a la frecuencia forzada (la respuesta es forzada en lugar de resonante). En estos casos, la frecuencia de excitación es diferente de la frecuencias de respuesta, ya que la onda de flexión forzada no tiene que coincidir con una frecuencia natural (las respuestas modales pueden no ser resonantes).

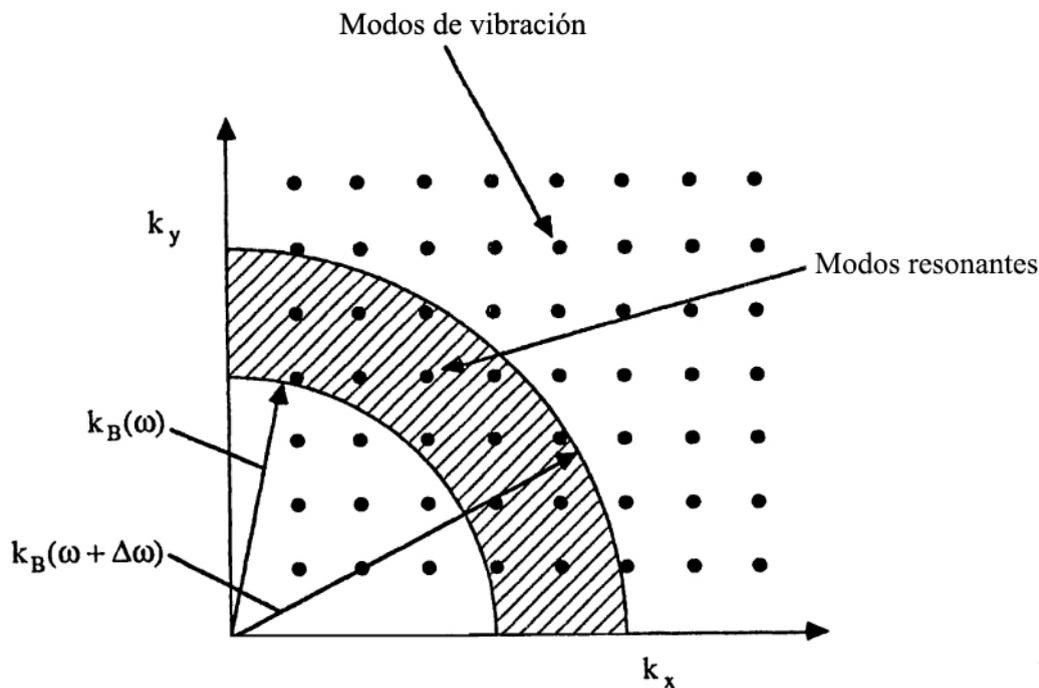


Figura 4.6: Ilustración de los conceptos de espacio de números de onda para una placa plana. Adaptación de Norton [44]

### Usos en el arte

De manera similar al tratamiento del material en la escultura sonora, en la arquitectura el material también puede funcionar como modelador del sonido, por ejemplo transmitiendo una sensación física a través de la vibración. En el campo del arte sonoro, existe un tipo de práctica que se propone explorar los efectos de la propagación del sonido en la infraestructura material de los edificios. Por ejemplo, la artista Maryanne Amacher ha realizado una serie de obras que exploran las vibraciones del sonido transmitido por la estructura. En *Synaptic Island: A Psybertonal Topology* (1992), una instalación para un sitio específico en cuatro espacios contiguos de un complejo cultural en la ciudad de Tokushima, en el sur de Japón, Amacher experimentó con frecuencias y texturas electrónicas “en un esfuerzo por articular “formas sonoras” táctiles nítidas o “caracteres sonoros” que se sienten como formas escultóricas grandes y pequeñas en distintas regiones del espacio” [110].

En otra instalación, perteneciente a la serie *Music for Sound-Joined Rooms*, Amacher colocó sistemas de parlantes en los pasillos y en las habitaciones de una casa abandonada en

St Paul, Minnesota para “crear niveles intensos de energía que circulaban por toda la casa, lo que obligaba a la gente a salir, a subir a una colina cercana, y a observar toda esta casa victoriana, toda esta estructura sonando” [51]. Como describe Amacher: «La arquitectura articula especialmente la imagen sonora en el sonido “estructurado”, aumentando el color y la presencia espacial a medida que las formas sonoras interactúan con características estructurales de las habitaciones antes de llegar al oyente» [22]. Tanto en este ejemplo como en el anterior, la artista utiliza la infraestructura material de la arquitectura como medio para articular forma en el sonido. Como dice Amacher, “el espacio se puede incorporar en la escultura de una obra sonora particular: en lugar de albergar una obra, la casa puede convertirse literalmente en la obra” [51, p. 176]. De igual manera considera la arquitectura “un cuerpo instrumental”, ya que el sonido transmitido por la estructura “crea sonido alargando la longitud de una onda sonora” [22].

De manera similar a las obras de Amacher, mediante el proyecto *Resonate architecture*, el colectivo de artistas The Art of Failure Collective busca generar la sensación de presencia física del sonido mediante la experimentación con materiales y arquitecturas resonantes. Mediante el uso de parlantes colocados dentro de hitos arquitectónicos en Alemania y Francia (una torre de observación de acero de 30 metros de altura, un complejo arquitectónico, contenedores de carga apilados y un dúo de monolitos de astracita, entre otros), reproducen frecuencias bajas que hacen resonar las estructuras y “revelan las frecuencias de resonancia, la fisicalidad y las cualidades acústicas de los edificios seleccionados” [69]. Esta práctica se basa en la idea de considerar a los edificios como instrumentos en sí, algo que será tratado en la siguiente sección.

Otro ejemplo destacado es la obra *The live Room*, del artista Mark Bain que consta de una instalación interactiva montada en el edificio N51 del campus del MIT, un viejo laboratorio de instrumentación que desarrollaba misiles balísticos y submarinos. La obra explora la relación entre el cuerpo y la arquitectura a partir de la creación de “sonido y vibración en relación directa con el edificio y las dimensiones del espacio” [38, p. 163]. La instalación estaba formada por 6 osciladores acoplados a un sistema de vigas rígidas ubicadas debajo del suelo sobre dos áreas del piso del salón. Como consecuencia, estas áreas funcionaban como resonadores afinados con frecuencias de pulso armónicas, que a su vez se transmitían al cuerpo de las personas que transitaban la instalación. Al mismo tiempo el artista colocó

arena en los puntos nodales de la superficie del piso para visualizar la propagación de la forma de onda, lo cual generaba “una topología que correspondía a las variación de la frecuencia de vibración del suelo y al arrastre generado por el público” (Ibid., p. 165). A partir del trabajo con la vibración, el artista apela a “inscribir la forma en el cuerpo”, es decir a percibir la forma sonora modelada en el cuerpo. Citando a Bain: “Los órganos, los huesos y los tejidos tienen frecuencias de resonancia particulares, y si estas frecuencias se inducen a través del cuerpo, las formas se pueden sentir junto con los índices de relación de las diferentes partes del cuerpo. Por lo tanto, el público era el objeto activado, la forma escultórica” (Ibid., p. 166).

### 4.3. Proyección con esculturas

Una de las prácticas más novedosas en el campo del arte sonoro es la que se propone explorar el modelado a través de la amplificación, proyección y dirección controlada del sonido mediante el uso de parábolas y cristales sónicos. Esta práctica trabaja en relación a varios efectos asociados a la difracción y reflexión del sonido y tiene como antecedentes históricos las ilusiones auditivas que se originan en la acústica de edificios formados por paredes curvas y cavidades.

Uno de los primeros en estudiar la influencia de la geometría en el comportamiento acústico de recintos fue el matemático jesuita Athanasius Kircher (Alemania, 1601 o 1602 - 1680, Roma). En el libro I de su obra más conocida, *Phonurgia Nova*, Kircher estudió el fenómeno del eco en techos abovedados y la capacidad de ciertas formas elípticas para reforzar y amplificar la voz humana. A partir de sus observaciones en el espacio interior del Palacio del Elector de Heidelberg, Kircher entendió que es posible utilizar los dos focos de una habitación con bóveda elipsoidal para maestros ”posicionar a dos personas que pudieran comunicarse fácil y claramente a una distancia entre sí” [113]. Asimismo, estudió la propagación del sonido en tubos con formas espiraladas (coqueato) de grandes dimensiones, que captaban y dirigían el sonido de una habitación a otra, o de una habitación a la boca de una estatua ubicada en otro salón contiguo, como se puede ver en la figura 4.7. A partir de las observaciones de Kircher, y a los efectos de organizar nuestro estudio sobre esculturas y estructuras que modelan el sonido, proponemos diferenciar entre aquellas que exploran los fenómenos asociados a la

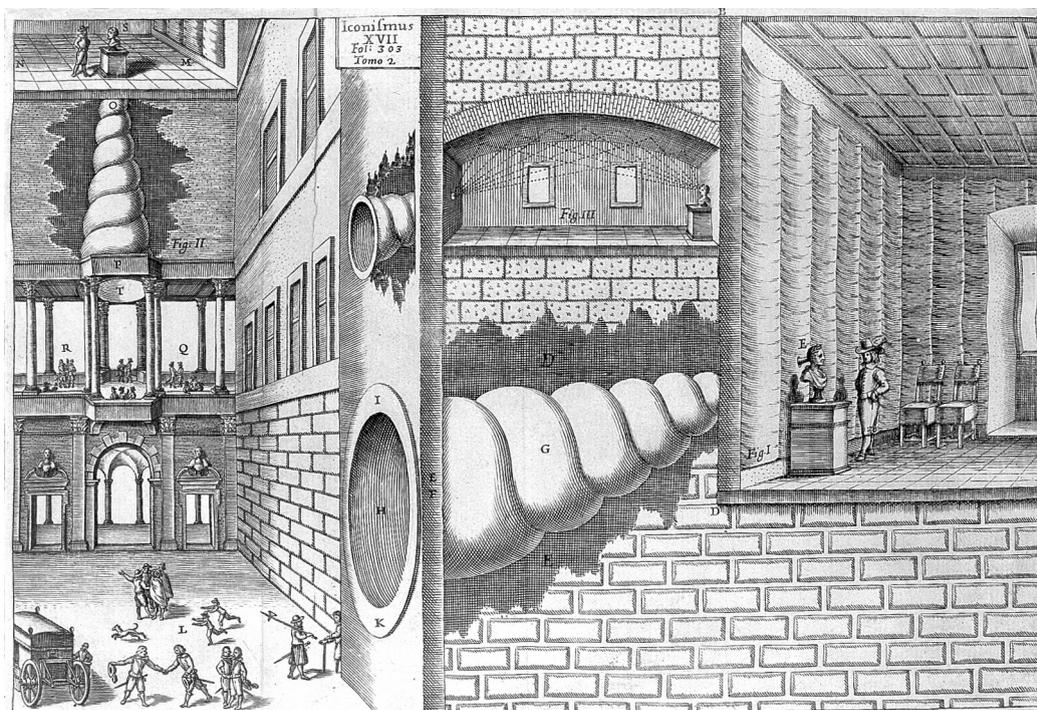


Figura 4.7: Kircher, A., “Musurgia universalis”, 1650, trompeta parlante. Fuente: Wellcome Collection gallery. Con licencia CC-BY-4.0

reflexión en formas cóncavas y parábolas y a la refracción en cristales sónicos, un tipo de compuesto periódico de investigación reciente en el campo de la acústica cuyo estudio se origina casualmente en una escultura.

#### 4.3.1. Reflexión con espejos acústicos parabólicos

Los espejos acústicos parabólicos son dispositivos reflectores diseñados para amplificar y concentrar el sonido en una dirección particular. La forma del disco del espejo acústico es un paraboloides, que es la proyección tridimensional que se obtiene al girar una parábola alrededor de su eje. Las propiedades geométricas del disco posibilitan que los rayos que entran paralelos al eje del disco se reflejen en la parábola y converjan en una ubicación específica delante del mismo y alineada con el centro de curvatura llamada *punto focal*. De la misma manera, los rayos emitidos por un alimentador colocado en el foco se reflejan por la parábola en un haz de rayos paralelos al eje de la parábola. La distancia del foco al punto de reflexión sobre la superficie parabólica se conoce como *distancia focal*.

Los espejos acústicos parabólicos presentan numerosas aplicaciones, como por ejemplo los localizadores y espejos acústicos que se utilizaron desde principios del siglo XX hasta finales de la Segunda Guerra Mundial. Estos dispositivos se construyeron alrededor de las costas de Inglaterra (como el que se ve en la figura 4.8), para detectar las aeronaves intrusas entrantes mediante la detección temprana del sonido de los motores [70]. Otras aplicaciones son los domos de sonido, es decir parlantes que pueden adquirir direccionalidad al proyectar el sonido contra una superficie parabólica, o los micrófonos parabólicos, que, ubicados en el punto focal permiten captar y amplificar sonidos de una o más fuentes distantes.



Figura 4.8: Tres dispositivos acústicos de alerta temprana, 2360 m al este de Jack's Court.

Fuente: Teseum. Con licencia CC BY-SA 4.0

Los espejos acústicos tienen la capacidad de funcionar como una lente, haciendo que una fuente suene más cerca de lo que realmente está. Muchos museos de ciencia y parques del mundo suelen realizar demostraciones de este efecto, como por ejemplo el Parque de los Deseos en Medellín, donde dos grandes domos enfrentados y distantes entre sí permiten que un hablante y un oyente se comuniquen fácilmente.

Para explicar las propiedades reflectantes de un espejo parabólico, comencemos por escribir

la ecuación de una parábola con distancia  $F$  en el plano  $x, z$

$$x^2 = 4F(F - z), |x| \leq \frac{D}{2} \quad (4.14)$$

donde  $D$  es el diámetro del disco parabólico y  $F$  la distancia focal. Si bien la parábola es totalmente descrita por estos dos parámetros, se suele considerar la altura vertical del disco  $H$  y el ángulo máximo entre el punto focal y el borde del disco ( $\theta_0$ ). La figura 4.9 ilustra la representación de un espejo parabólico, con la definición de los parámetros descritos.

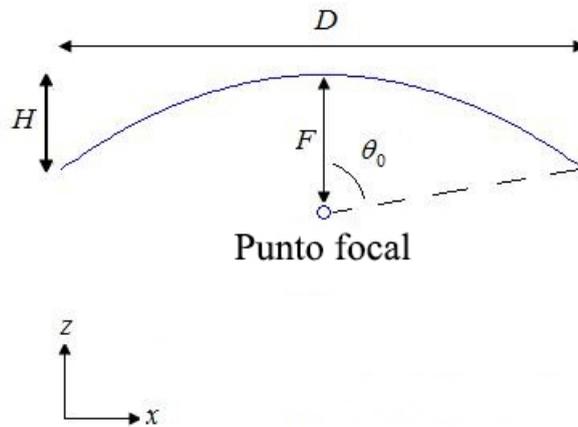


Figura 4.9: Ilustración de la parábola con la definición de parámetros. Adaptado de <https://www.antenna-theory.com/>

Estos parámetros se relacionan entre sí mediante las siguientes ecuaciones

$$\frac{F}{D} = \frac{1}{4 \tan(\theta_0/2)} \quad (4.15)$$

$$F = \frac{D^2}{16H} \quad (4.16)$$

La cantidad de señal captada que se concentra en el foco corresponde al factor de ganancia, que depende del diámetro del disco, de la eficiencia y de la frecuencia de operación. La eficiencia representa las pérdidas óhmicas del espejo parabólico, y se define como la relación

de la potencia radiada y la potencia de entrada. La ganancia del espejo es directamente proporcional al diámetro del espejo e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. En un espejo parabólico de abertura circular, la ganancia  $G$  viene dada por la expresión

$$G = \eta \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (4.17)$$

donde  $\eta$  es la eficiencia,  $D$  es el diámetro del disco parabólico y  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia de operación.

### Usos en el arte

Un ejemplo destacado del uso de reflectores parabólicos en el campo del arte sonoro es la obra *Water Mirror* (1997), de Bernhard Leitner. En este trabajo, Leitner usa dos reflectores parabólicos metálicos suspendidos en un santuario simbólico en la cabecera del río Danubio. La idea es alterar la arquitectura auditiva del paisaje sonoro, enfocando los sonidos del río hacia abajo en el templo y hacia quien esté debajo de los reflectores (Leitner 1998, 265). Los reflectores actúan como un filtro, focalizando y amplificando determinadas frecuencias del sonido del río. La persona entra en una especie de diálogo con el río, “a través de los movimientos de búsqueda, exploración y escucha de la cabeza y el cuerpo” dentro del santuario [25].

Siguiendo esta misma idea, podemos mencionar la instalación permanente *Sound Playground* (1993), ubicada en la ciudad de Nueva York, realizada por los artistas Bill y Mary Buchen. En ella se destacan las esculturas *Big Eyes*, *Big Ears*, *Speaking Dishes*, *Parabolic Dishes* y *Echo Chamber*, que consisten en diferentes trabajos centrados en las propiedades acústicas de discos parabólicos. Por ejemplo en la obra *Speaking Dishes*, se trabaja con dos discos parabólicos de acero inoxidable de dos metros y medio de diámetro montados en forma vertical y paralelos entre sí. Las caras cóncavas de los discos están enfrentadas, de manera que forman “un espacio acústico resonante donde los sonidos son reflejados, amplificados y concentrados” [37].

Otros ejemplos de formas parabólicas que concentran y amplifican el sonido son las conchas

acústicas, como las emplazadas en las costas del balneario inglés de Littlehampton. Estas esculturas, diseñadas por el arquitecto Flanagan Lawrence, consisten en dos estructuras de hormigón con geometría cóncava y curvilínea, pensadas originalmente como lugar de descanso y espacio de actuación para los eventos comunitarios y las bandas tradicionales. La mayor de las esculturas mira a la ciudad y “sirve para amplificar el sonido producido por los músicos que tocan frente a su superficie cóncava”. La otra en cambio mira hacia la playa, y funciona como “refugio para escuchar el sonido del mar, o para que los músicos callejeros actúen frente al paseo marítimo” [98]. En la figura 4.10 se puede apreciar una de las estructuras, con una banda de músicos tocando en su interior.



Figura 4.10: Acoustic Shells, de Flanagan Lawrence

Por último, queremos mencionar la obra *Instrumento músico* (2004), de F. Daumal et. al, una instalación formada por una estructura en forma de domo que recuerda al efecto de galería de susurros descrita por Kircher. La obra, presentada en el Mapapoètic del FORUM 2004 de Barcelona, consiste en un recinto elipsoidal realizado a base de poliéster, cuya estructura “permite concentrar la energía de un susurro y transportarlo a una distancia de 2,50 m” [62]. Un orador situado en un foco emisor transmite su mensaje (en este caso la lectura de un poema de Luis Cernuda) a un receptor situado en un foco receptor. La energía del susurro se transporta 2,50 m desde el punto de lectura y se amplifica 14 dB en el punto de escucha.

### 4.3.2. Refracción en cristales sónicos

En su realización más simple, un cristal sónico (CS) consiste en una matriz bidimensional de cilindros rígidos en el aire, tal como se ilustra en la figura 4.11. La particularidad de este tipo de material es que muestra una gran variación de sus propiedades acústicas solo al cambiar su configuración geométrica [32].

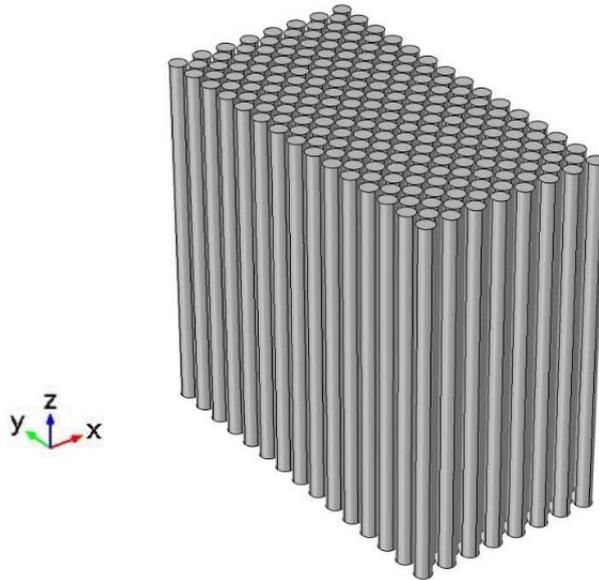


Figura 4.11: Esquemático de un cristal sónico. Adaptación de Ibiza [95]

Los cristales sónicos han sido ampliamente estudiados debido a sus singulares propiedades de transmisión y reflexión. Estas propiedades se extienden desde las bandas prohibidas (BG<sup>1</sup>) [27] hasta la refracción negativa [50], la birrefracción negativa [61], focalización sonora [39] y la formación de imágenes [45]. Cuando una onda de sonido incide en una cristal sónico, el comportamiento resultante cambia drásticamente según su frecuencia: puede bloquearse (en el rango de frecuencia de banda prohibida), refractarse, difractarse, dividirse o enfocarse.

En este capítulo estudiamos el fenómeno de focalización por refracción negativa en CS, el cual resulta interesante puesto que provoca la ilusión de que la fuente sonora se encuentra más próxima que su posición real, similar al efecto que provoca una lente [103]. La refracción negativa es un fenómeno en el cual los rayos de sonido que emanan de la fuente se invierten a lo largo de la dirección tangente cuando entran en el CS y se vuelven a invertir al salir. Por

---

<sup>1</sup>Del inglés band-gap

lo tanto, la energía emitida por una fuente puntual se concentra en una región que coincide con la línea central formando una imagen de la fuente. La figura 4.12 muestra este fenómeno de manera esquemática según la anchura del haz de sonido incidente: en el esquema de la izquierda, no hay focalización, mientras que los otros dos esquemas muestran refracciones negativas dando lugar a una distancia focal que se aleja a la vez que el tamaño del haz es cada vez más pequeño.

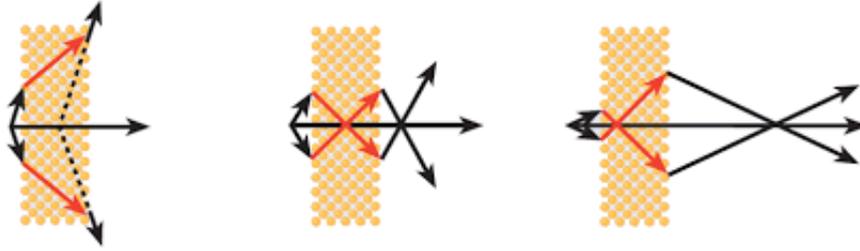


Figura 4.12: Ilustración del fenómeno de refracción negativa en un cristal sónico. Extraído de Hu et al. [46]

Para comprender este fenómeno es preciso considerar primero la refracción entre dos medios regulares e isótropos. Cuando una onda incide en un medio sólido, parte de la energía se refleja y otra parte se transmite a través del sólido y genera una onda saliente, que se propaga en el sólido con un ángulo de refracción  $\theta_2$ . La ley de Snell, que es la que gobierna la reflexión y refracción de ondas de cualquier naturaleza que ocurre en la interfaz entre dos medios diferentes, requiere que las componentes tangenciales de los vectores de onda de la onda incidente y la onda refractada sean iguales. Sea  $\vec{k}_1$  el vector de onda de una onda plana que incide de manera oblicua en el medio sólido y  $\vec{k}_2$  el vector de onda de la onda refractada, donde  $\vec{k}_1 = \omega/c_1$  y  $\vec{k}_2 = \omega/c_2$ . Según la ley de Snell, matemáticamente se tiene que cumplir que

$$\vec{k}_1 \sin\theta_1 = \vec{k}_2 \sin\theta_2 \quad (4.18)$$

donde los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se indican en la figura 4.13. Dado un índice de refracción  $n_1$  y  $n_2$ ,

donde  $n = k_2/k_1$ , la ley de Snell puede ser escrita como

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4.19)$$

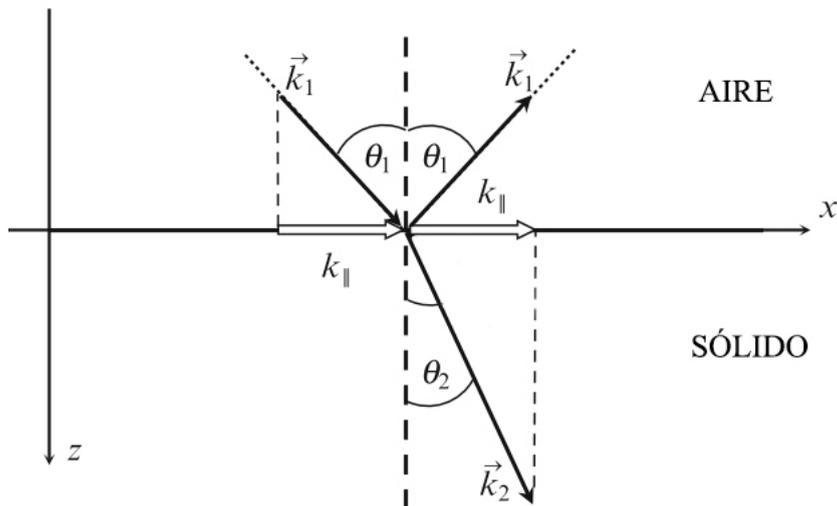


Figura 4.13: Reflexión y refracción de una onda plana que incide oblicuamente en la interfaz aire/sólido desde el aire. Nótese la conservación del vector de onda tangencial a la interfaz. Adaptación de Sukhovich et al.[91]

La refracción de una onda en la interfaz entre dos medios se suele visualizar convenientemente mediante las curvas de equifrecuencia, que corresponden a la magnitud del vector de onda  $\vec{k}$  de una onda plana propagándose en un medio dado en función de la dirección de propagación. En un medio isótropo, las superficies de isofrecuencia son esferas perfectas, dado que la magnitud (módulo) del vector  $\vec{k}$  es independiente de la dirección de propagación, como se ilustra en la figura 4.14.

Otra propiedad importante de las curvas de isofrecuencia es que en cada punto la dirección de la velocidad de grupo  $\vec{v}_g$  (que corresponde a la dirección de la energía de la onda transportada), coincide con la dirección de propagación de la normal a la superficie de equifrecuencia. En otras palabras,  $\vec{v}_g$  está dada por el gradiente de  $\omega$  en función del vector  $\vec{k}$ :

$$\vec{v}_g = \vec{\nabla}_{\vec{k}} \omega(\vec{k}) \quad (4.20)$$

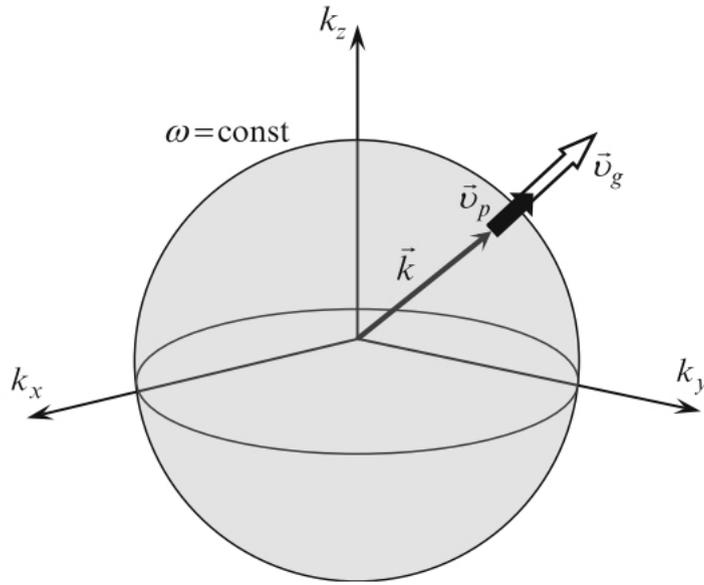


Figura 4.14: Superficie de isofrecuencia para un medio isótropo. Extraído de Sukhovich et al. [91]

Por otro lado, la dirección de la velocidad de fase  $\vec{v}_p$  (que equivale a la dirección de propagación de la fase) está dada por la dirección del vector  $\vec{k}$ , y además coincide con la velocidad de grupo  $\vec{v}_g$ . Es decir, la velocidad de fase y la de grupo apuntan en una misma dirección, tal cual se ilustra en la figura 4.14.

La periodicidad de un CS lo convierte en un medio anisótropo, en el cual la magnitud del vector  $\vec{k}$  es *dependiente* de la dirección, y por lo tanto, las curvas de equifrecuencia no serán más esferas perfectas. Es decir, dentro del cristal, el vector de onda puede variar su módulo de acuerdo a la dirección de propagación. Como consecuencia, el gradiente  $\vec{\nabla}_{\vec{k}}\omega(\vec{k})$  apunta en la dirección contraria al vector  $\vec{k}$ . El resultado es una onda en la que la velocidad de grupo  $\vec{v}_g$  es antiparalela al vector  $\vec{k}$ , como se ilustra en la figura 4.15. En consecuencia, la velocidad de fase  $\vec{v}_p$  y la velocidad de grupo  $\vec{v}_g$  van en sentido contrario. Como la onda se refracta en el lado negativo de la normal, el índice de refracción toma un valor negativo y decimos que la onda se refracta negativamente. De allí el nombre de *refracción negativa*.

Este fenómeno presenta aplicaciones en ingeniería de prismas y lentes de cristal sónico, que van desde superlentes acústicos con características de enfoque ideales [48] hasta lentes

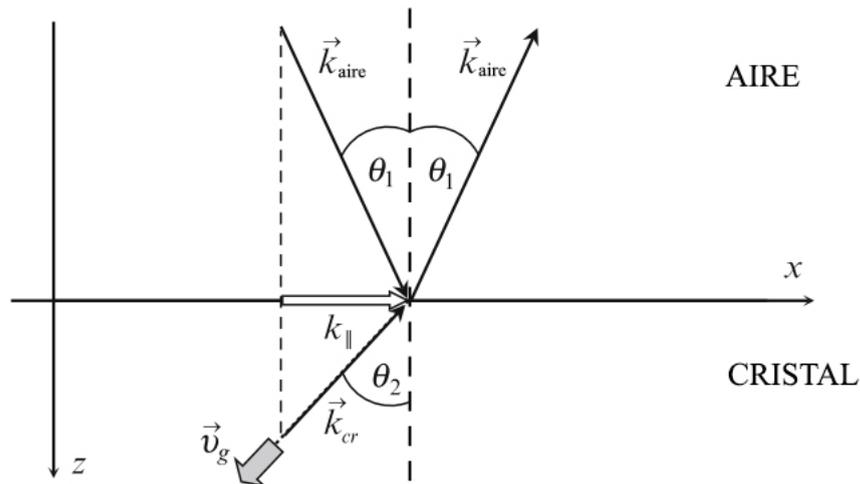


Figura 4.15: Reflexión y refracción de una onda plana que incide oblicuamente en la interfaz aire/sólido desde el aire. Nótese la conservación del vector de onda tangencial a la interfaz. Adaptación de Sukhovich et al.[91]

de forma de haz con zonas focales largas [47].

### Usos en el arte

La primera evidencia de las inusuales propiedades acústicas de un cristal sónico, provino de las mediciones realizadas en una escultura minimalista diseñada por Eusebio Sempere, y expuesta en la Fundación Juan March de Madrid (figura 4.16). Este trabajo [18] seminal mostró que la repetición de varillas cilíndricas rígidas dispuestas en una red, inhibía la transmisión del sonido para ciertos rangos de frecuencia (band-gaps), de manera análoga al ya conocido efecto de los cristales fotónicos sobre la luz [14]. Pero además motivó el uso de CS en esculturas para modelar la propagación del sonido durante la interpretación, o, como dicen Blesser & Salter, para “embellecer la arquitectura auditiva” [67, pág. 11]. Queremos mencionar dos ejemplos de obras que los utilizan: *The Cochlea Unwound* del dúo Liminal (Frances Crow y David Prior) y *Sonic Crystal Room* (SCR) de Oscar Edelstein y Manuel Eguia.

*The Cochlea Unwound* es una propuesta para una instalación de sonido permanente que consta de ocho secciones de cristales sónicos formados por cilindros rígidos, ubicada junto



Figura 4.16: Órgano, de Eusebio Sempere. Foto: Asqueladd. Con licencia CC BY-SA 3.0

a Diglis Weir en Worcester, Reino Unido. Desde la primera hasta la octava sección, las columnas aumentan progresivamente su diámetro y su parámetro de red en un 20 por ciento, lo que provoca que ciertas frecuencias del ruido del vertedero se atenúen y amplifiquen. Las variaciones en las dimensiones de las columnas y el parámetro de la red generan un mapa de frecuencias tonotópicas en el espacio que busca recrear el efecto de la membrana coclear a gran escala. A medida que el visitante camina por la instalación, los cristales sónicos “esculpen el ruido de la presa en una composición sonora que se desarrolla según la velocidad a la que el visitante pasa por la estructura y su proximidad a la estructura” [77, pág. 95]. De acuerdo con esta idea, los cristales sónicos son considerados esculturas que reconfiguran los sonidos del ambiente, involucrando activamente a los visitantes en el acto mismo de escuchar. Como dice Prior (2010), “en lugar de diseñar un dispositivo que creara nuevos sonidos, necesitábamos diseñar un dispositivo que alentara la reconsideración de los sonidos ya presentes” (Ibid., p. 98).

*SCR* consistió en el desarrollo de una sala dedicada a la instalación de actúaciones musicales y escénicas, que utiliza un cristal sónico formado por 100 columnas de sección cuadrada en forma de “U”, de 3 m de altura y 15 cm de lado, organizado en cinco módulos autóno-

mos que se pueden mover por la sala durante la actuación. A diferencia de The Cochlea Unwound, cada columna en SCR puede rotar independientemente cambiando la geometría de los cristales, lo que les permite funcionar como prismas y espejos acústicos que modifican dinámicamente las cualidades tímbricas, la direccionalidad y, en general, la percepción espacial de fuentes acústicas cercanas (como músicos, cantantes o locutores). La Sala constituyó la materialización del trabajo de colaboración interdisciplinario iniciado por Oscar Edelstein y Manuel Eguia y continuado luego junto con el resto de nuestro grupo como parte del Programa de Investigación “Perspectiva Acústica”. SCR será descrita en detalle en la sección 5.5.

# Parte II

## Segunda parte



# Capítulo 5

## Cristales sónicos como extensión de instrumentos musicales

### 5.1. Introducción

En el presente capítulo presentamos un nuevo tipo de instrumento musical, desarrollado por nuestro grupo para funcionar en una posición intermedia entre el oyente y la fuente. El mismo consiste en cristal sónico cuya configuración geométrica puede variarse en pos de reforzar, atenuar o desviar la propagación de ciertos armónicos de una fuente acústica. Como fue descrito en la sección 4.3.2, los cristales sónicos (CS) son estructuras periódicas compuestas de dispersores rígidos (típicamente cilindros) que permiten bloquear o desviar la propagación de las ondas en un rango de frecuencias acotado, actuando como una lente acústica o guía de ondas. Pero la particularidad de este tipo de estructuras que hace que se vuelva interesante para el diseño de dispositivos acústicos es que es posible variar sus propiedades cambiando su configuración geométrica.

La figura 5.1 muestra el CS, que consta de 60 columnas de madera en perfil U que pueden rotar independientemente, montadas en una estructura de 3.6 X 1.5 X 2.6 m (ancho X profundidad X altura). El CS se localiza entre la fuente y el oyente, de manera que este último recibe el sonido emitido por el instrumento musical después de ser modificado por el CS. La configuración geométrica (y por lo tanto las propiedades acústicas del cristal) puede variarse rotando las columnas.

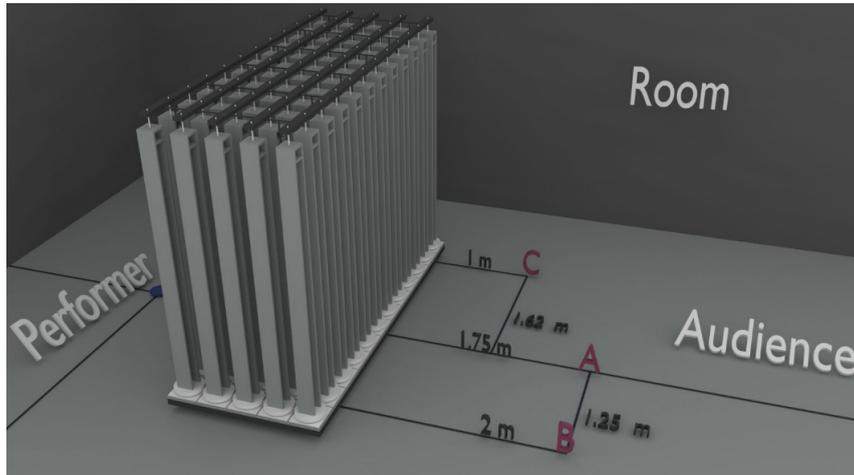


Figura 5.1: Vista esquemática del Cristal Sónico, colocado entre la fuente (intérprete, punto azul) y la audiencia. Las ondas de sonido que irradian desde la fuente son dispersadas por las columnas del cristal sónico y luego modificadas por la habitación. Las propiedades acústicas de este dispositivo se pueden modificar cambiando su configuración geométrica, es decir, girando las columnas en forma de “U” alrededor de sus ejes verticales. Las letras rojas indican las posiciones de grabación (ver 5.3)

Podemos considerar al CS como un nuevo instrumento musical, puesto que crea nuevas sonoridades basadas en un instrumento acústico existente, además de que representa un cambio en la interacción usual entre el performer, el instrumento musical, la audiencia y la sala. Esta idea aparece representada en la figura 5.2, donde se ilustra el flujo de información háptico y acústico en una situación de performance tradicional (panel *a*), y en una versión alternativa que incorpora el CS (panel *b*). En la versión tradicional, el performer ejecuta su instrumento actuando sobre la fuente y el resonador, o ambos, y recibe retroalimentación háptica y acústica de este. A su vez recibe información acústica del instrumento (sonido directo) y del recinto (señal reverberante). En cambio, en la versión alternativa (panel *b*) el performer puede, además de tocar su instrumento, cambiar la configuración del CS. Las ondas acústicas que salen del resonador del instrumento se modifican mientras viajan por el aire y atraviesan el CS. Lo mismo ocurre con el sonido reverberante, ya que la mayoría de las ondas acústicas que llegan a las paredes fueron previamente dispersadas por las columnas del CS. Tanto el performer como el público reciben una versión modificada del sonido directo

y del sonido reverberante. En consecuencia, el CS puede ser considerado como un nuevo instrumento musical que modifica las características de la señal directa y reverberante de una fuente sonora por medios puramente acústicos.

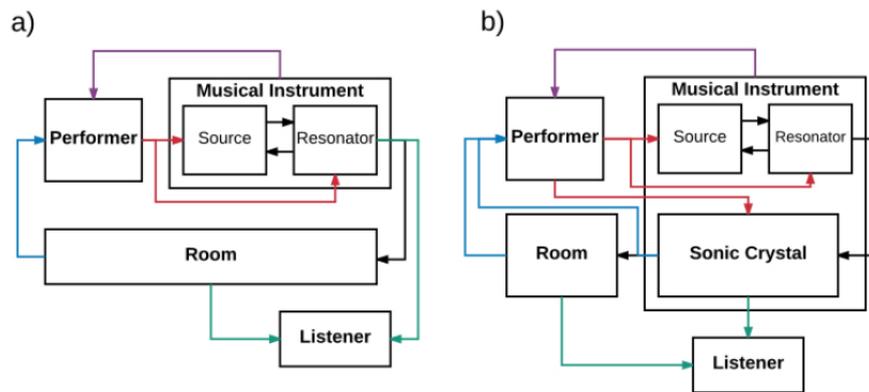


Figura 5.2: Flujo de información acústico y háptico para (a) una interpretación musical tradicional y (b) la interpretación basada en cristales sónicos propuesta en este trabajo. Las flechas de colores representan el flujo de información para las diferentes etapas de performance

## 5.2. Cristal sónico y modelo teórico

Con el fin de evaluar el efecto de diferentes configuraciones del CS en el campo sonoro generado por una fuente acústica, desarrollamos una herramienta interactiva basada en un esquema de elementos finitos 2D basado en la API de COMSOL. Una interfaz gráfica desarrollada en Matlab nos permitió controlar la frecuencia y la ubicación de la fuente, y la posición angular de cada columna individual de forma interactiva. También incorporamos una condición de contorno parcialmente absorbente que coincide con los coeficientes de las paredes absorbentes de sonido de la sala que utilizamos para las grabaciones (espuma piramidal de melamina). El CS utilizado para el modelo está compuesto por 60 columnas de madera en sección “U”, de 2.70 m de alto y 15 cm de lado, dispuestas en una red cuadrada de 12 X 5, a una distancia de 30 cm entre centros. Las mismas se apoyan sobre una plataforma móvil con crapodina, que a su vez está vinculada mediante una correa dentada a un motor paso a paso. Este sistema permite que cada columna pueda rotar de manera independiente

y así, modificar la configuración geométrica del cristal sónico. El control de los motores paso a paso se realiza mediante 6 placas Arduino Nano (cada placa controla 2 filas de columnas), que se comunican con una minicomputadora Raspberry Pi Zero W a través del protocolo I2C.

Para este estudio exploratorio, identificamos tres patrones espaciales característicos del campo de presión sonora que pueden conducir a cambios en los atributos espaciales y tímbricos de la fuente: (a) inhibición de la transmisión, (b) focalización en la región central, y (c), focalización en dos haces diagonales. Luego seleccionamos tres configuraciones que exhiben estos comportamientos para cierto rango de frecuencias y que pueden transformarse entre sí mediante gestos dinámicos. En la figura 5.3 se muestran, arriba, las tres configuraciones estudiadas, y en las tres filas de abajo, los niveles de presión sonora para tres frecuencias seleccionadas ( $f=700, 800$  y  $1350$  Hz). Las dimensiones del campo estudiado en la simulación son  $8 \times 4.4$  m y la fuente se indica con un pequeño círculo blanco a la derecha. En la primera configuración (izquierda), todas las columnas están rotadas a  $45$  grados en sentido horario desde la dirección perpendicular al CS (configuración “todas a  $45$ ”). En este caso, se observa un band-gap alrededor de  $700$  Hz, una focalización central a  $800$  Hz y una focalización en dos haces diagonales formando un patrón de “V” característico alrededor de  $1350$  Hz (fila de abajo). La segunda configuración (“zigzag”) corresponde a las columnas rotadas a  $45$  grados, en sentido horario y antihorario en filas alternativas. Se observan cambios sutiles con respecto a la configuración anterior, mostrando una transmisión notoria a  $700$  Hz con un ligero patrón en forma de “V”, un desplazamiento del foco del haz más alejado con respecto al CS a  $800$  Hz, y un patrón en forma de “V” menos marcado a  $1350$  Hz. En la tercera configuración (“Divergente”) la mitad izquierda (como visto de la fuente) de las columnas del CS están rotadas  $45$  grados en sentido horario; la otra mitad, en sentido opuesto. Se observa una focalización central cercana al CS a  $700$  Hz y el patrón en forma de “V” se recupera a  $1350$  Hz.

Para cada rango de frecuencias, las configuraciones del CS reorganizan la distribución de energía acústica en la sala. Desde un punto de vista musical, podemos considerar que estas configuraciones constituyen filtros espaciales de los armónicos de una nota, creando diferentes timbres en regiones localizadas del espacio, afectando la percepción espacial y segregando parciales. Otra hipótesis es que los gestos inducen cambios dinámicos en las

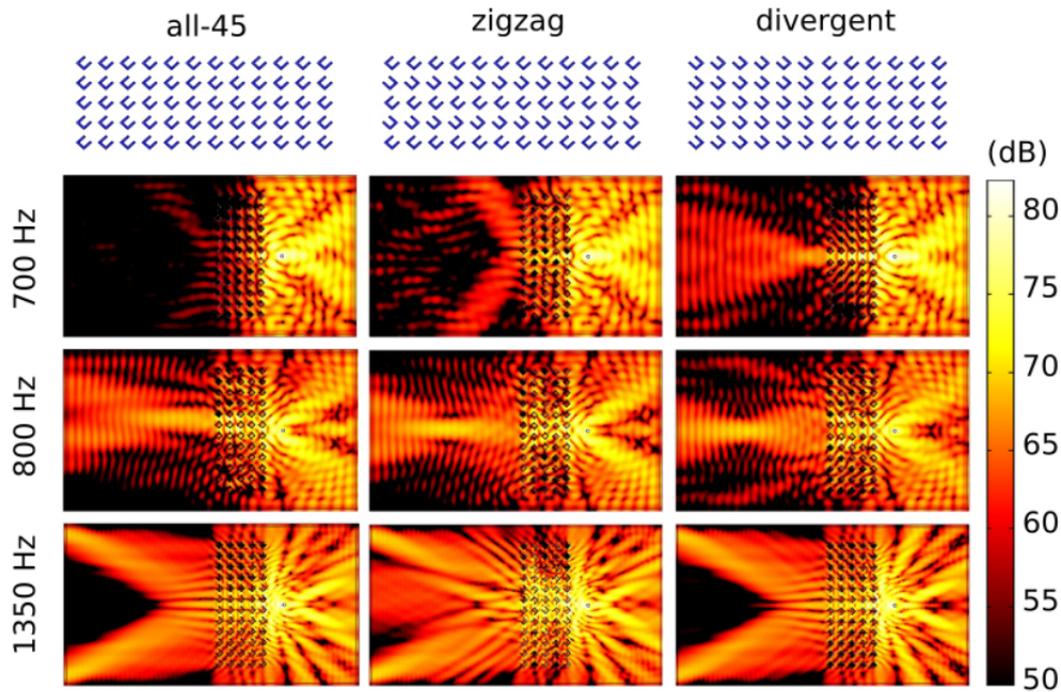


Figura 5.3: Representación esquemática de las tres configuraciones estudiadas (fila superior) y mapas de niveles de presión sonora para tres frecuencias fijas obtenidos mediante un modelo FEM.

características espaciales y tímbricas de una nota. Para verificar estas hipótesis, realizamos grabaciones binaurales de dos instrumentos musicales ubicados detrás del CS, y evaluamos dos magnitudes derivadas de estas grabaciones relacionadas al timbre y a la localización de las fuentes acústicas: la intensidad binaural (BI) y la diferencia interaural de intensidad (ILD), como se describirá en la siguiente sección.

### 5.3. Materiales y métodos

Para las grabaciones se usó un saxofón alto y un barítono, tocados por dos músicos entrenados. De un lado del CS se colocaron los músicos, con la campana del instrumento apuntando a la línea central y a 0.5 m de distancia del CS. Del otro lado se colocó la cabeza de maniquí equipada con dos micrófonos omnidireccionales DPA 4060. Por cada instrumento y para cada configuración mostrada en la figura 5.3, se realizaron tres grabaciones en tres posiciones distintas (A, B, C) mostradas en la figura 5.1. Se eligieron siete notas dentro

del registro óptimo de cada instrumento, de manera tal que la frecuencia de los armónicos tercero y quinto cayeran dentro del rango de frecuencia afectado por al menos una de las tres configuraciones bajo estudio. Las notas elegidas se muestran en la fila superior de la figura 5.4. También grabamos una secuencia de gestos (transiciones entre configuraciones) mientras el músico grababa una nota larga en la misma ubicación que antes. Finalmente, repetimos la grabación sin utilizar el CS, como referencia para la intensidad de los diferentes parciales de las notas.

Para las grabaciones binaurales computamos la BI y la ILD separadamente por cada armónico luego de filtrarlas con un filtro pasabanda. Las magnitudes binaurales para cada armónico se obtuvieron como

$$\begin{aligned} BI &= 10 \log_{10}(s_l s_r) - 10 \log_{10}(r_l r_r) \\ ILD &= 20 \log_{10}(s_l / s_r) \end{aligned} \tag{5.1}$$

donde  $s_l$  y  $s_r$  son los valores RMS que corresponden a los canales izquierdo y derecho de las grabaciones binaurales (después del filtrado) con el CS, y  $r_l$  y  $r_r$  son las mismas magnitudes para las grabaciones de referencia sin el CS.

Un valor de BI significativamente distinto de cero indica que algún armónico fue atenuado o reforzado (produciendo un alteración en el timbre) con respecto al sonido original, mientras que un ILD diferentes del valor teórico determinado por el ángulo de azimuth indica que algún armónico podría ser en principio segregado espacialmente. Es importante aclarar que restringimos nuestro análisis por encima de 1 KHz debido a que a baja frecuencia la ILD no es útil como clave de localización.

## 5.4. Resultados

En la figura 5.4 se muestran las dos secuencias de notas tocadas por los músicos. También se muestra, en escala de color, la BI y la ILD para cada armónico individual, hasta 2000 Hz para una configuración y posición particular como ejemplo de los resultados obtenidos. Un valor positivo de ILD corresponde a un nivel de intensidad sonora más alto en el canal izquierdo. Para el saxofón barítono seleccionamos la configuración “divergente” y la grabación en la

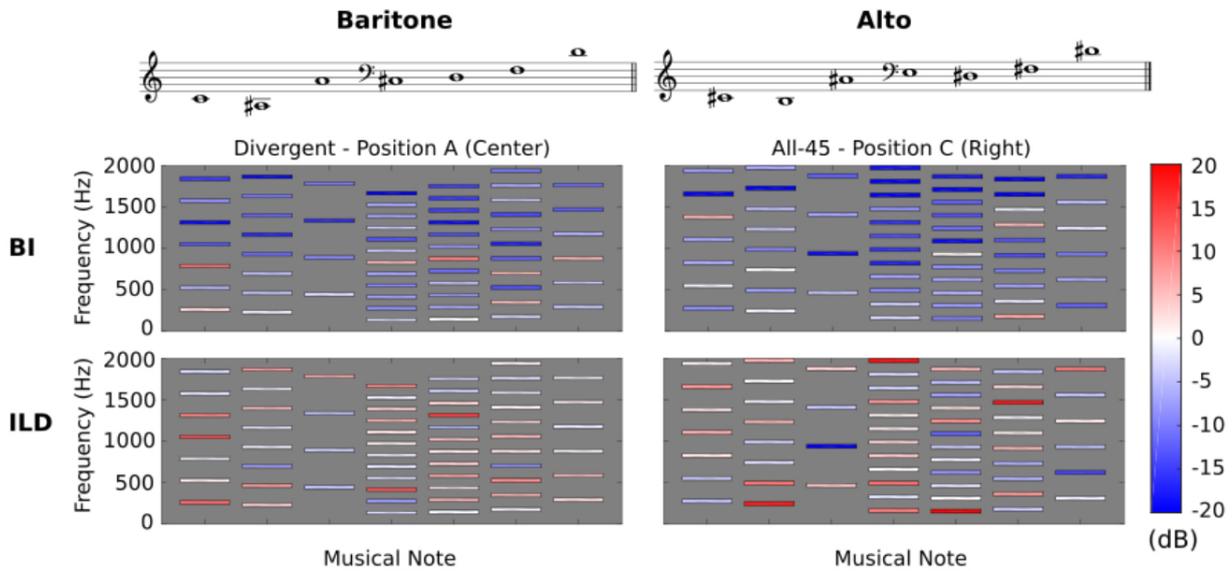


Figura 5.4: Análisis espacial y tímbrico de las notas tocadas por los músicos. En la fila superior se muestran las partituras correspondientes al saxofón barítono y alto. La intensidad binaural (BI) y la diferencia interaural de nivel (ILD) para cada armónico de la nota musical alineada verticalmente (hasta 2000 Hz) se muestran como un código de color en las dos filas inferiores.

posición A (centro), con el objetivo de mostrar el efecto de la focalización central alrededor de 800 Hz (ver figura 5.3, columna derecha, fila central). Algunos de estos armónicos cerca de esta frecuencia son reforzados, como puede verse en el diagrama de BI. Efectos notorios (BI más grande que 5 dB) se observan en el tercer armónico de la primera y última nota, y en el sexto armónico de la cuarta y quinta nota. La ILD de las notas (incluyendo todos los parciales) fue cercana a cero en promedio, como se esperaba. Para el saxofón alto mostramos un ejemplo de la configuración “todas a 45” grabada en la posición C (derecha), que cae aproximadamente en uno de los haces diagonales del patrón en “V” a 1350 Hz. (ver figura 5.3, fila de abajo). Se observa un refuerzo notorio en la BI cerca de esa frecuencia sólo en la primera y en la sexta nota (quinto y séptimo armónico, respectivamente). Para esos armónicos la ILD es cercana a cero, lo cual se desvía de los valores positivos absolutos de las notas (la fuente está localizada a la izquierda de la cabeza de maniquí). Sin embargo, para algunas notas el refuerzo es más sutil o Casi no se observa refuerzo significativo. Esto se

debe probablemente a la variabilidad inherente a cada instrumento durante la ejecución. Para las demás configuraciones y posiciones, observamos un comportamiento similar. Para cada secuencia de siete notas, grabadas en una determinada posición y para una configuración dada, un promedio de cuatro notas mostraron un refuerzo o desplazamiento significativo en los armónicos, como se predijo. Esto permite considerar al CS como un instrumento que modifica de manera novedosa las características espaciales y tímbricas de una fuente acústica, al reforzar o desviar la propagación de sus armónicos. Sin embargo, la expresión más convincente de este dispositivo se obtiene variando la configuración durante la ejecución de la nota, lo que llamamos un “gesto” del CS.

La figura 5.5 ilustra los cambios observados en la ILD para los 8 primeros armónicos de una nota repetida (D4 para el barítono y B3 para el alto) tocada durante los gestos del CS: comenzando de la configuración “todas a 45” y cambiando a “zigzag” y divergente. La duración de las notas fue aproximadamente igual a la duración de los gestos (seis segundos). Se puede ver claramente que la ILD de los armónicos (y consecuentemente la localización angular de los parciales más altos) cambia durante la ejecución de la nota. Por ejemplo, el cuarto y quinto armónicos de la nota tocada por el saxofón barítono durante los dos primeros gestos y el tercer armónico del saxofón alto durante los cuatro gestos muestran variaciones de la ILD por más de 30 dB durante la ejecución.

Es altamente plausible que estos cambios dinámicos en la ILD podría contribuir a la segregación espacial de los correspondientes armónicos, tanto desde una lateralización de nivel inferior como desde una suposición de nivel superior de una regla de “destino común” que actúa sobre ellos. Los armónicos superiores también muestran variaciones en la ILD, sin embargo el efecto en la localización y la segregación es probablemente menor debido al efecto en la celeridad de estos cambios y el menor nivel en los armónicos. También hay que notar que el segundo y el cuarto gesto son versiones invertidas en el tiempo del primer y tercer gesto, respectivamente. Se observa una simetría temporal aproximada en todos los armónicos por encima del sexto, pero se conserva menos en los últimos dos armónicos.

En resumen, en este capítulo presentamos un nuevo instrumento musical que es capaz de modificar de forma dinámica algunas características tímbricas y espaciales de las fuentes acústicas durante la performance. Hicimos un primer análisis sucinto de los cambios en la BI y en la ILD de los armónicos de siete notas tocadas por dos instrumentos musicales. Estudios

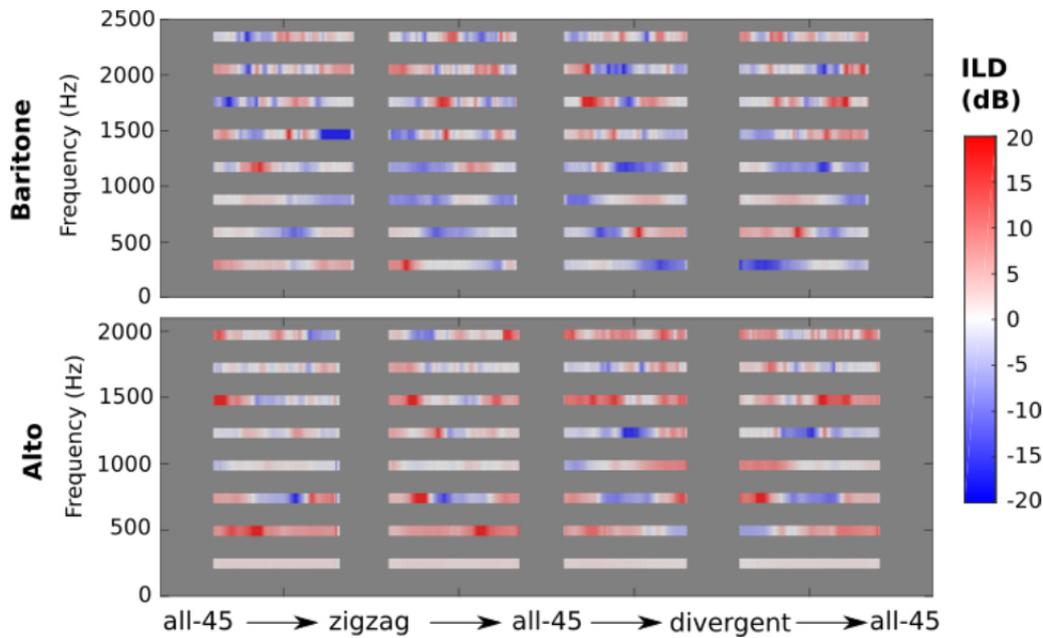


Figura 5.5: ILD para un D4 y un B3 tocados por un saxofón barítono y alto, respectivamente. El ILD se calculó a partir de una grabación de la nota tocada mientras se realizaba un gesto de cristal sónico de seis segundos de duración. Las configuraciones intermedias de los gestos se indican en la parte inferior de la figura.

a futuro podrán llevarse a cabo para estudiar los efectos perceptivos de dichas modificaciones.

## 5.5. Sala Cristal Sónico

Sala Cristal Sónico (SCR) es una sala dedicada a la instalación de performances escénicas y musicales desarrollada por Oscar Edelstein y Manuel Eguía. Los cristales sónicos que dan nombre a la sala se desarrollaron a partir de un prototipo anterior (como el descrito en el capítulo anterior), y están formados por 100 columnas con sección en forma de “U” cuadrada de 3 metros de alto y 15 cm de lado, dispuestos en una red cuadrada de 30 cm de lado. Los cristales están organizados en cinco módulos autónomos que pueden desplazarse dentro de la sala durante la performance. Cada columna puede girar de forma independiente sobre su eje vertical controlado por un motor paso a paso, cambiando la configuración geométrica del cristal. Diferentes configuraciones tienen diferentes propiedades acústicas de transmisión reflexión y refracción del sonido en cada rango de frecuencias. Por tal motivo, en SCR, los

cristales sónicos funcionan como prismas y espejos acústicos que modifican la percepción sonora del espacio, generando ilusiones de desplazamiento, aceleración y perspectiva a partir de fuentes de sonido convencionales. De esta forma, ubicados cerca de fuentes acústicas (instrumentistas, cantantes o un parlante), los cristales sónicos modifican las cualidades tímbricas, de direccionalidad y en general la percepción espacial de las mismas. Cada una de las columnas cuenta además con un LED RGB de alta potencia que, al igual que los motores, es controlado de forma independiente a través de la electrónica oculta en la base de los módulos.

En el marco de la Sala se presentó *Viaje a la Catedral de Santa Mónica de los Venados* (ver 5.6), una ópera con un elenco de diez cantantes y trece músicos compuesta específicamente por Oscar Edelstein a partir de estudios previos realizados con los cristales sónicos en 2018. SCR y la ópera fueron concebidos como un viaje a través de diferentes “casas de acción”, asociadas a las diversas configuraciones espaciales de los cristales. En la ópera, el público recorría la sala asociando posiciones en el espacio y configuraciones de los cristales con diferentes pasajes de la ópera. El estreno fue cubierto por gran parte de los medios gráficos nacionales y locales, también tuvo amplia difusión y resonancia en redes sociales. asistieron a las doce funciones programadas numerosos referentes locales provenientes de la Ciudad de Buenos Aires como también de varias provincias argentinas (Córdoba, Mendoza, San Juan, Entre Ríos, entre otras) y de la mayoría de las disciplinas artístico-científicas involucradas, además de numeroso público en general, que agotó las entradas disponibles para cada una de las funciones.

SCR estuvo abierta al público de forma continua del 29 de marzo al 16 de abril de 2019 en el auditorio Nicolás Casullo de la Universidad Nacional de Quilmes. Además de la ópera albergó obras de otros artistas de la Escuela Universitaria de Artes, muchos de ellos integrantes de nuestro grupo, que estuvieron participando de los ensayos y las pruebas de los cristales para presentar o bien trabajos originales o adaptaciones de obras previas a la SCR. Las obras presentadas fueron *Memoria del Río I y II* de Martín Proscia, */\*hz\*/* de Mauro Zannoli, *CORE* de Cecilia Castro, *Películas Cristalizadas* de Federico Joselevich Puiggrós, *UNX*, *Polaridades Rupestres* de Rosa Nolly, *Estudios en Perspectiva: IRIS* de Leonardo Salzano, y *edo reversio* de Pablo Riera. Alguna de estas obras se presentaron en horarios específicos con performances en vivo mientras que otras se acercaban más al formato de instalación en



Figura 5.6: Sala Cristal Sónico, una nueva idea de teatro desarrollada de Oscar Edelstein y Manuel Eguia que trabaja con principios derivado de Sonic Crystals. La foto fue tomada durante la representación de *Viaje a la Catedral de Santa Mónica de los Venados*, ópera compuesta por Oscar Edelstein. Foto: Sergio Santillán

la que el público podía recorrerlas a lo largo de todo el día en que estaban programadas. Esto permitió una gran afluencia de gente a lo largo de las tres semanas.

Como parte de la Sala, además de los cristales sónicos se presentó *IRIS*, una escultura sonora basada en principios similares a los cristales formada por dos discos perforados de 1.80 metros de diámetro que pueden girar de forma independiente. El modelo a escala de *IRIS* se utilizará como prototipo de esta tesis en el próximo capítulo. Para el control del movimiento de los cristales e *IRIS* se optó por desarrollar una plataforma mixta que usa alternativamente tres interfaces de control: dos gráficas desarrolladas en javascript y processing y una notebook en Jupyter para live-coding en python. Todas ellas se comunican mediante el protocolo OSC con cada una de las minicomputadoras de los módulos de cristal sónico, que a su vez controlan los motores y las luces. Esta flexibilidad permitió usos tan diversos de los cristales sónicos como proyectar películas usando los LEDs (a modo de pixels) moduladas por los movimientos de las columnas (como en la obra de Joselevich), o hacer live-coding con sistemas dinámicos

y feedback usando los modos de las distintas configuraciones del cristal (la obra de Riera). Además permitió que durante la ópera se pudiera realizar de forma paralela el control de luces, audio y configuraciones del cristal.

# Capítulo 6

## Un caso particular de estudio: mallas acústicas

### 6.1. Introducción

El estudio de estructuras periódicas constituye desde hace décadas un tema de análisis y discusión relevante en el campo de la acústica, debido a sus propiedades únicas de transmisión y reflexión del sonido. Un ejemplo comúnmente estudiado son, como vimos, los cristales sónicos, que en su versión más simple consisten en estructuras compuestas de una red periódica de cilindros cuyas propiedades acústicas dependen únicamente de la geometría. Recientemente ha cobrado relevancia el estudio de las mallas acústicas (MA), y entre ellas, las mallas dobles acústicas (ADF), las cuales consisten en una estructura doble de placas perforadas periódicamente y separadas entre sí. Como veremos más adelante, estas estructuras presentan mínimos y máximos de transmisión resonante vinculados al acoplamiento y desacoplamiento de los modos de la cavidad y de la superficie. En el presente capítulo nos concentraremos en primer lugar en las propiedades de transmisión de las mallas perforadas con una red de agujeros, y en segundo lugar, en las propiedades de transmisión de las mallas dobles acústicas. El objetivo es estudiar una aplicación de un ADF en una escultura musical que posibilite modular de forma dinámica las características tímbricas, dinámicas y espaciales de las fuentes sonoras en situación de performance.

## 6.2. Transmisión en una malla acústica

Las mallas acústicas (MA) son estructuras periódicas formadas por arreglos de orificios de sub-longitud de onda. La inclusión de un arreglo periódico de orificios en una placa rígida perfectamente homogénea genera por un lado la construcción de modos de superficie (surface modes, o SF, por sus siglas en inglés), que se originan gracias a la contribución colectiva de cada orificio, y por otro, la formación de modos de guía de onda que se forman dentro del canal del orificio, llamados resonancias de Fabry-Perot (FP) [63].

Los parámetros clave para describir las MA son el radio del agujero  $r_0$ , la distancia entre los agujeros  $a$ , el espesor de malla  $h$  y la fracción de llenado  $f$ , definido en este caso como el cociente entre el área del agujero y el área de celda unidad. Estos parámetros se ilustran en la figura 6.1. Por lo tanto, en una red cuadrada (que es la que abarca la presente tesis) la fracción de llenado es  $f = \pi r_0^2/a^2$ . Como veremos más adelante, este parámetro es muy útil en el estudio de las propiedades de transmisión de la MA.

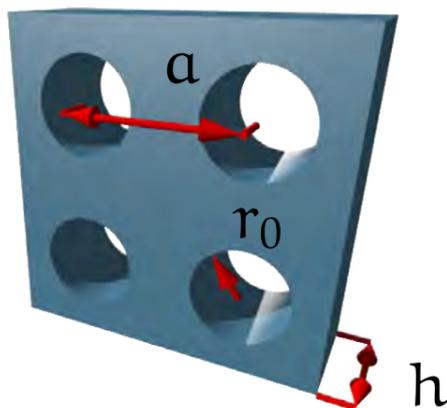


Figura 6.1: Diagrama de los parámetros geométricos de una malla acústica, donde  $r_0$  es el radio del agujero,  $a$  la periodicidad del arreglo y  $h$  el espesor de la placa para una red cuadrada (que es la que alcanza la presente tesis). Adaptado de Estrada et al. [92]

Las MA se caracterizan por presentar mínimos y máximos de transmisión resonante vinculados al acoplamiento y desacoplamiento de las resonancias de FP y los SF. Los SF suelen tener una longitud de onda comparable a la periodicidad de la red, y dependen en gran medida del ángulo de incidencia. En cambio, las resonancias de FP, tienen una longitud de

onda que está determinada por las dimensiones transversales/longitudinales del orificio, y no son sensibles al ángulo de incidencia [58]. En placas delgadas, la transmisión es debida principalmente a los SF, mientras que en placas de mayor espesor, la transmisión es debida a las resonancias de FP (Ibid.). En efecto, el parámetro geométrico dominante, que controla la ubicación espectral de las resonancias de FP en una MA es el espesor de placa [73, pág. 125].

Cuando la longitud de onda de la onda reflejada es cercana al periodo de la red, la transmisión es nula y aparece un mínimo de transmisión (o band-gap) que se conoce como *Anomalía de Wood-Rayleigh*. Dependiendo del espesor de la placa, emergen picos de transmisión a longitudes de onda apenas superiores al periodo de la red, que se origina por el acoplamiento entre una onda guiada que recorre la placa y tiene la periodicidad de la red (función de Bloch) con las resonancias de FP originadas en las cavidades [63]. Esta resonancia se puede “afinar” ajustando la altura de los orificios, y el factor de llenado [73, pág. 125]. Este fenómeno es comúnmente llamado transmisión acústica extraordinaria (EAT), y debe su nombre a que el sonido transmitido a través de una red de orificios de sub-longitud de onda es mayor de lo que podría esperarse sobre la base de la transmisión a través de una solo orificio. EAT fue observado experimentalmente en placas perforadas con redes de ranuras [60] y orificios [59], respectivamente, y estudiado teóricamente en arreglos unidimensionales y bidimensionales de agujeros cuadrados [63]. La transmisión resonante se puede modular variando el factor de llenado [64], el período [63] y la simetría de la red [68]. En otro trabajo experimental [65], se observó que, a ciertas frecuencias ultrasónicas para longitudes de onda cercanas al período de la red, una placa de aluminio perforada sumergida en agua transmite menos sonido que una placa no perforada, un fenómeno conocido como apantallamiento acústico extraordinario.

### 6.3. Transmisión en una malla doble acústica

Otro caso particular de placas perforadas es la malla doble acústica (ADF), que consiste en una estructura doble de placas perforadas con una red de orificios periódicos de sub-longitud de onda y separadas entre sí. La Figura 6.2 ilustra un ADF, donde se indica el espesor de la placa  $h$ , el período de la red  $p$ , el diámetro del orificio  $d$ , la separación entre placas  $dg$ , el desplazamiento lateral  $lx$  y longitudinal  $ly$ .

En un trabajo [76] se mostró que la transmisión en un ADF está asociada, por un lado,

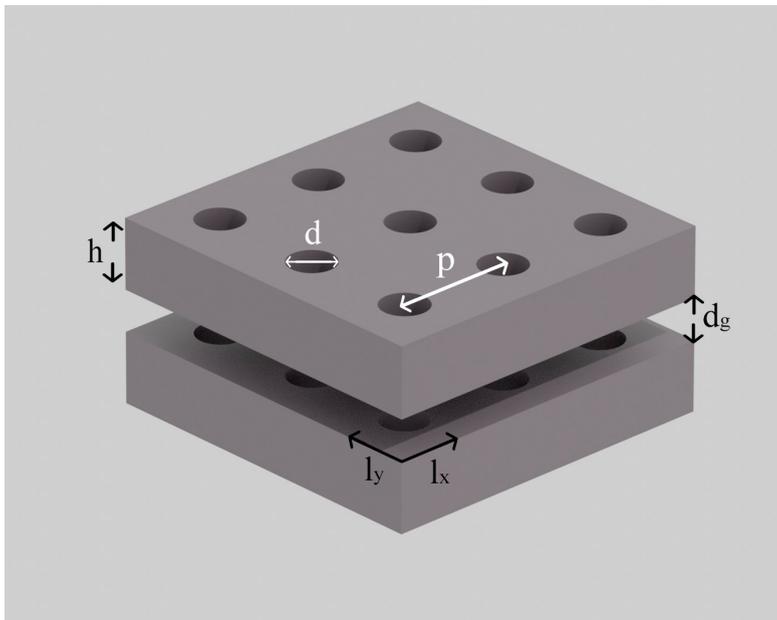


Figura 6.2: Ilustración esquemática de una red acústica doble (ADF). Consiste en un par de placas de espesor  $h$ , perforadas con orificios redondos de diámetro  $d$ , en una red cuadrada de período  $p$ , separadas por un hueco  $d_g$ , y que pueden desplazarse lateralmente en los ejes  $x$  e  $y$  ( $l_x$  y  $l_y$ ).

con los modos híbridos resultantes del acoplamiento entre las ondas acústicas superficiales y las resonancias FP de las cavidades, y por otro lado, las resonancias de FP que surgen en el intervalo de separación entre las placas. Los picos de transmisión se pueden ajustar variando el acoplamiento entre placas, que depende del intervalo de desplazamiento lateral ( $l_x$ ) y longitudinal ( $l_y$ ) y del ángulo de la onda incidente.

En un trabajo posterior se mostró la presencia de un BG originado en el acoplamiento entre las resonancias de FP en las cavidades y la frecuencia de resonancia del intervalo de separación entre las placas, definida principalmente por la periodicidad de la red. La posición y el ancho del BG puede ajustarse variando el periodo de la red y la separación entre las placas [74].

Estas características muestran similitud con el efecto de focalización asociado con la refracción negativa que, como vimos anteriormente, se observa en los cristales sónicos y otros materiales periódicos. Si bien en un cristal sónico se demostró que este efecto varía espacialmente con la frecuencia [47, 116], la distribución espacial de los picos de transmisión

resonante en un ADF aún no se ha estudiado bien.

En el siguiente capítulo estudiaremos la focalización de un haz y su distribución espacial y espectral utilizando una malla doble acústica en *IRIS*, una escultura sonora formada por dos discos con perforaciones periódicas y rotación independiente. El objetivo del estudio es desarrollar un instrumento que permita modular de forma dinámica las características tímbricas, dinámicas y espaciales de las fuentes sonoras en situación de performance.

# Capítulo 7

## *IRIS*: una escultura sonora basada en una malla doble acústica variable

### 7.1. Introducción

Desde mediados del siglo XX, la mayoría de los artistas pioneros de la escultura sonora se preocuparon por la fisicalidad del sonido, que se puede considerar que involucra dos aspectos que identificamos como materialidad y espacialidad. Trabajar con la materialidad, por un lado, implica considerar el sonido como una cualidad del objeto tangible, resultado de la combinación de su material y forma. En este caso, la escultura se considera mayoritariamente un instrumento musical, en el que predomina el uso de resonadores acústicos. El artista pionero Harry Partch exploró esta tendencia, creando instrumentos y esculturas que exploraron la fisicalidad del sonido, guiados por lo que él consideraba las actividades del hombre primitivo en busca de “sonidos mágicos, belleza formal y visual y ritual” [31, pág. 196]. Pero la síntesis más completa entre arte, estética e ingeniería se encuentra en las esculturas musicales de Bernard y François Baschet, en las que, como describe el propio Bernard, “el sonido es solo complementario, o incluso el punto de partida para trabajar con materiales” [8, p. 1]. Un ejemplo representativo de su trabajo lo podemos encontrar en *Sound Structures* (figura 7.1), una amplia familia de instrumentos musicales cuya construcción se basa en una cadena de fuentes, resonadores y difusores acoplados, diseñados con una amplia gama de materiales como acero, vidrio, fibra o cartón, y modelados con formas cónicas, cilíndricas, retorcidas,

etc.



Figura 7.1: Sound Structures, de Bernard y François Baschet. Foto: Jean-Pierre Dalbéra. Con licencia CC BY-SA 2.0

Trabajar con la espacialidad, por otro lado, implica considerar al sonido como un material escultórico en sí mismo, que manifiesta su cualidad física en el espacio y puede percibirse a través del cuerpo. Esta práctica, cuyo ejemplo más claro se encuentra en las instalaciones de Bernhard Leitner o Michael Brewster, busca crear una sensación de fisicalidad corporal a través de la generación de ambientes sonoros inmersivos con el uso de una distribución de parlantes fija. Como dice Vadim Keylin, en estas obras, “el sonido en sí mismo está esculpido en una forma espacial” [102, pág. 188]. Un ejemplo representativo lo podemos encontrar en *Serpentinata* (2006), una escultura de Bernhard Leitner que consta de un tubo de plástico flexible de 25 m, 16 m de largo y 65 mm de diámetro, equipado con 40 parlantes, como se puede apreciar en la figura 7.2. El propio Leitner describe su trabajo como “movimientos sónicos lineales” que representan “arcos sonoros que envuelven el espacio y bailan alrededor de las personas que han entrado en la escultura”.

En resumen, en las esculturas de Baschet, la fisicalidad del sonido aparece como resultado de la combinación de material y forma, que a su vez determina las características espectrales del sonido. En cambio, en las instalaciones de Leitner, la fisicalidad se manifiesta en el



Figura 7.2: Serpentinata, de Bernhard Leitner, en el Festival Sonambiente de Berlín 2006. Foto: Régine Debatty. Con licencia CC BY-SA 2.0

sonido como una escultura que toma forma en el espacio, o, como dice Bernd Schulz, como “material dentro del contexto de un concepto expandido de escultura” [35, pág. 14]. Sin embargo, tanto en las esculturas de Baschet como en las instalaciones sonoras de Leitner, el material escultórico se considera una fuente de sonido. Cabe aclarar que esta discusión, de ningún modo exhaustiva, se propone como contexto para presentar la propuesta de este trabajo.

En esta tesis proponemos que los aspectos de materialidad y espacialidad pueden ser explorados a partir de métodos que no involucran la generación de sonido, es decir, por medios puramente acústicos y en una posición intermedia entre la fuente y el oyente. Nuestra propuesta se basa en el uso de materiales compuestos periódicos, una innovación reciente en el campo de la acústica, que, conectado al campo del arte sonoro, ha llevado a su aplicación en esculturas sonoras como un nuevo método para modelar de forma puramente acústica las características espaciales y espectrales de las fuentes. Un ejemplo comúnmente estudiado de material compuesto periódico son los cristales sónicos, que, como vimos anteriormente, fueron descubiertos precisamente a partir de una escultura sonora. En el capítulo anterior

mostramos la implementación de un cristal sónico como extensión de instrumentos musicales y su aplicación en la Sala Cristal Sónico, una sala dedicada a la instalación de performances musicales.

En el presente capítulo nos concentraremos en *IRIS*, una escultura que se propuso como parte de la Sala Cristal Sónico, y que funciona con principios derivados de las mallas dobles acústicas, las cuales fueron descritas con detalle en la sección 6.3. *IRIS* está formada por dos discos de 1,80 m de diámetro con perforaciones periódicas y rotación independiente, y busca explorar la relación entre el sonido, el espacio y la fisicalidad. En la figura 7.3 se puede apreciar una imagen de la escultura *IRIS* durante una de las funciones de la ópera de Edelstein. La motivación de *IRIS* surge de la experimentación basada en el concepto del sonido como fenómeno de naturaleza corpórea, material, que puede modelarse independientemente de la fuente, como esculpido en el espacio. Partiendo de este concepto, *IRIS* se propone como una escultura musical que busca modelar el timbre en el espacio por medios puramente acústicos, operando como un filtro espacial para los armónicos de un sonido, generando diferentes timbres en diferentes lugares. Metafóricamente se puede describir como una herramienta que permite pintar o embellecer el color tímbrico en una composición, mejorando la interpretación del compositor de forma creativa.

Este capítulo tiene como objetivo mostrar la posibilidad de generar un haz de focalización de sonido mediante la implementación de un ADF de geometría variable en *IRIS*, lo que permite modular espacial y espectralmente el haz. Más precisamente, lo que busca es mostrar el efecto de una modulación en la localización espacial y espectral de una focalización en el rango de frecuencia relevante para la música, que ocurre cuando el sonido atraviesa los discos mientras giran (como el iris que regula la intensidad de la luz que recibe el ojo, de ahí su nombre). De esta manera, esperamos poder controlar las propiedades espaciales y espectrales de las fuentes acústicas en una situación de performance.

Para ello, primero se analizará un estudio predictivo realizado con un modelo numérico de un prototipo de ADF exacto utilizado en *IRIS*, y luego una serie de mediciones acústicas y binaurales realizadas en el laboratorio. A continuación, se mostrarán dos ejemplos de aplicación musical utilizando una respuesta de impulso dependiente del tiempo (IR) de *IRIS* convolucionada con un tono FM sostenido y con una progresión de acordes sintetizados, para realizar una modulación espacial de “color tímbrico”. Finalmente, se realizará un test

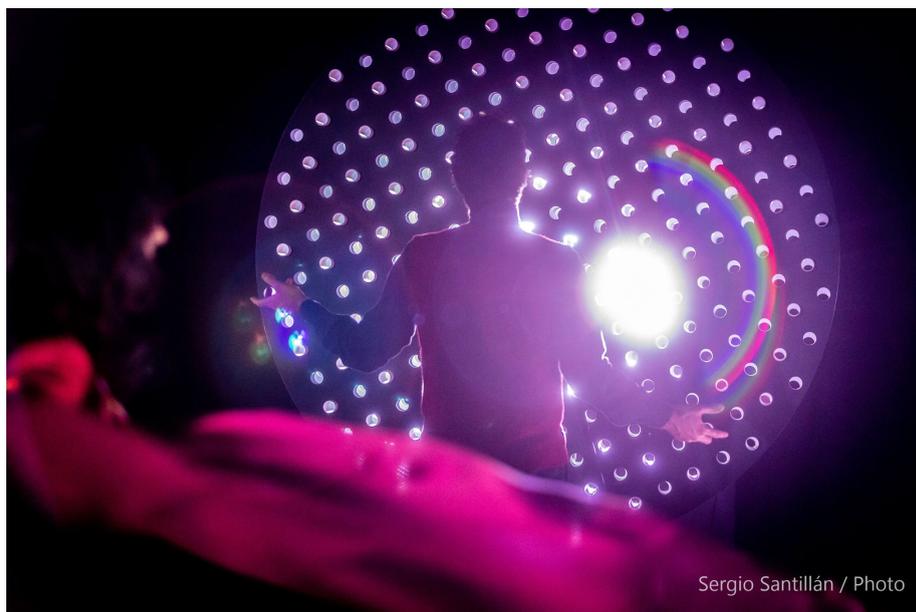


Figura 7.3: *IRIS* durante la presentación de la ópera *Viaje a la Catedral de Santa Mónica de los Venados* en el Auditorio Nicolás Casullo de la Universidad Nacional de Quilmes, en marzo de 2019. Foto: Sergio Santillán / Foto (usada con autorización).

psicofísico con el fin de hacer una evaluación preliminar del efecto de *IRIS* en la progresión de acordes.

## 7.2. Desarrollo experimental

### 7.2.1. Métodos de medición acústica

#### Escultura

La figura 7.4(a) muestra una ilustración esquemática de la configuración experimental y la figura 7.4(b) una imagen de *IRIS* con los orificios del disco alineados. *IRIS* consta de dos discos perforados de 1,80 m de diámetro, 6 cm de espesor y separados por una distancia de 3,5 cm, que giran de forma independiente sobre un eje montado sobre un soporte de hierro, mediante un sistema de poleas acoplado a dos motores paso a paso. Cada disco se construyó con un marco de madera revestido con dos placas circulares perforadas y un tubo de 6 cm de largo por 4 cm de diámetro en cada perforación. Los discos están perforados con una red cuadrada de orificios de 4 cm de diámetro con un espaciado periódico de 10 cm. Los motores

paso a paso están controlados por una minicomputadora Raspberry Pi 3 que se comunica a través del protocolo I2C con una placa Arduino Mega, que controla simultáneamente dos controladores digitales de micropaso 2DM542. El control del movimiento, la velocidad y la aceleración de cada motor paso a paso se controla de forma remota mediante el protocolo OSC, implementando un programa Python que se ejecuta como servicio en la Raspberry Pi.

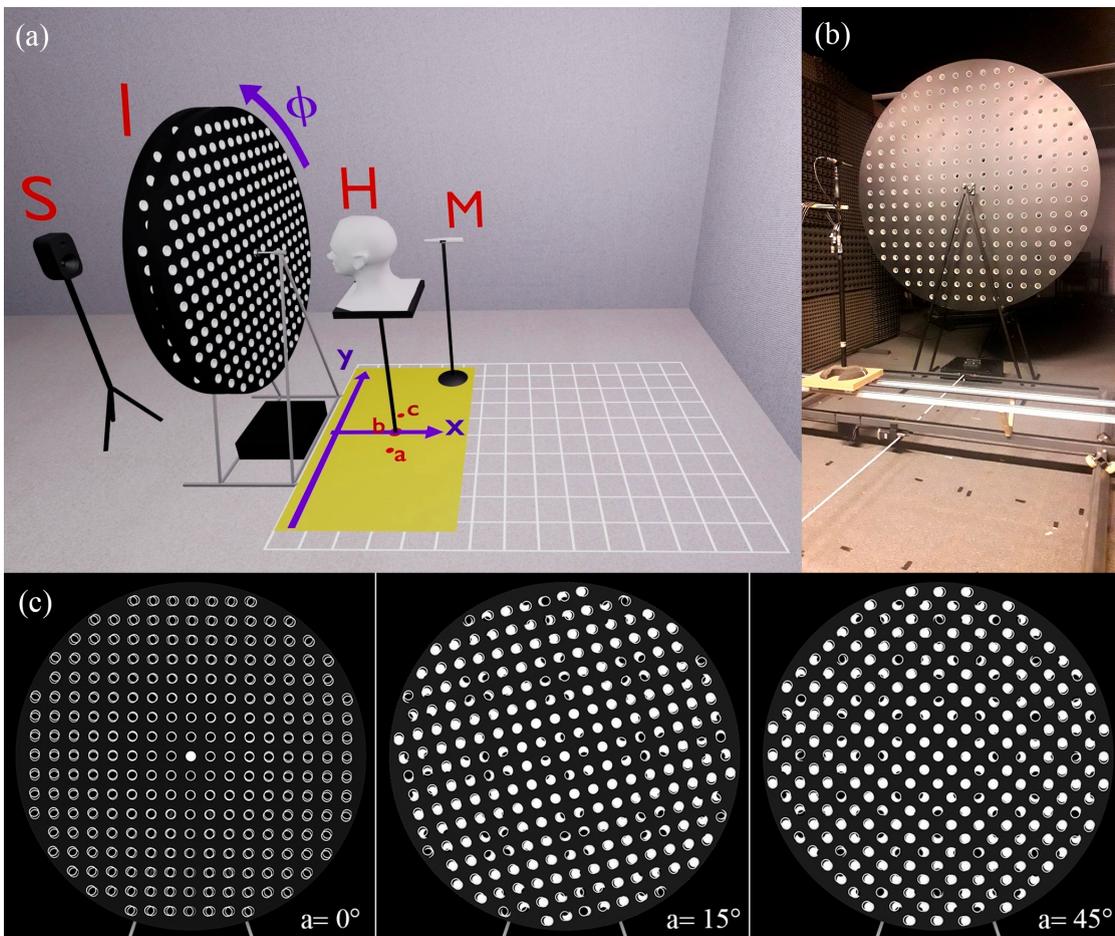


Figura 7.4: (a) Ilustración esquemática (no a escala) de la configuración experimental que ilustra la posición de la fuente  $S$ ,  $IRIS$   $I$ , el micrófono  $M$  en una posición arbitraria y la cabeza binaural  $H$  en la posición  $b$ . En amarillo se indica el área de medición y en rojo las tres posiciones de la cabeza binaural  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Los ejes indican la dirección longitudinal  $y$  y transversal  $x$  de  $IRIS$ . (b)  $IRIS$  con los orificios del disco alineados. También se observa un carrito de medida con el micrófono de medición acústica frente a  $IRIS$ . (c): Las tres posiciones angulares del disco trasero de  $IRIS$  bajo estudio:  $a = 0^\circ$ ,  $a = 15^\circ$  y  $a = 45^\circ$

## Modelado numérico

Se realizó un modelo tridimensional de la escultura incrustado en una caja de 2.5 X 2 m de aire con condiciones de contorno de capa perfectamente emparejada (para evitar reflejos) utilizando la implementación del Método de Elementos Finitos en COMSOL 5.5. Las dimensiones de los discos, orificios y red se mantuvieron constantes ya que son parámetros no modificables. Estas dimensiones se determinaron previamente para obtener un rango de focalización en torno a 2 kHz. Por el contrario, tanto los ángulos de rotación relativos como la distancia entre los discos se exploraron de forma paramétrica.

## Medidas acústicas y binaurales

Para medir experimentalmente la transmisión acústica de *IRIS*, se obtuvieron respuestas de impulso monoaural y binaural utilizando el método de barrido logarítmico [57] entre 30 Hz y 20 kHz. La figura 7.4 (a) muestra una ilustración esquemática de la configuración experimental donde se observa la posición de la fuente *S*, *IRIS I*, el micrófono de medición acústica *M* en una posición arbitraria y la cabeza de maniquí *H* en la posición *b*. El área de medición para la respuesta de impulso monoaural se indica en amarillo y en rojo las tres posiciones de la cabeza de maniquí *a*, *b* y *c*. Los ejes indican la dirección longitudinal *y* y transversal *x* de *IRIS*. Como fuente, se utilizó un monitor Genelec 8030B ubicado 1 m detrás de *IRIS*, centrado en la dirección *y* como se indica en la figura 7.4 (a), y a 1,50 m de altura. La fuente y los micrófonos se controlaron a través de una placa de sonido híbrida MOTU mk3 y una computadora Mac mini. Se midieron tres posiciones angulares del disco trasero de *IRIS*, que se indican en la figura 7.4 (c) como  $a=0^\circ$  (izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (derecha).

Para las mediciones de respuesta impulso monoaural, se utilizó como receptor un micrófono de medición acústica Earthworks M30, ubicado como se muestra en la 7.4 (a), a una altura de 1.50 m y desplazado por un carro automatizado en dirección *x* y *y*, que se puede ver en la Figura 7.4 (b). Medimos la respuesta a impulso de *IRIS* en una cuadrícula de 18 X 15 en pasos de 45 mm cubriendo un área de medición de 810 mm por 630 mm (rectángulo amarillo en la figura 7.4) (a). A partir de la Transformada Rápida de Fourier de las respuestas de impulso obtenidas, calculamos la respuesta de magnitud del sistema en función de la frecuencia y

posición a lo largo de la dirección y entre -315 mm y 315 mm y  $x=650$  mm, para ángulos  $a=0^\circ$ ,  $a=15^\circ$  y  $a=45^\circ$ . También calculamos el campo de presión sonora (en dB) dentro del área de medición indicada por el rectángulo amarillo que se muestra en la figura 7.4 (a), para ángulos  $a = 0$ ,  $a = 15$  y  $a = 45$ . Para las mediciones de respuesta a impulso binaural, se utilizó una cabeza de maniquí hecha a medida con un par de micrófonos DPA 4060 de alta sensibilidad, ubicados como se muestra en la figura 7.4 (a) a una altura de 1,50 m, 760 mm en la dirección  $x$ , y con la oreja derecha centrada en el eje de simetría  $y=0$ , la cabeza centrada en  $y=0$  y la oreja izquierda centrada en  $y=0$ , posiciones  $a$ ,  $b$  y  $c$  en la 7.4 (a). También calculamos la respuesta de magnitud (dB) en función de la frecuencia y la posición angular del disco trasero del *IRIS* entre 0 y 90 grados para las posiciones de la cabeza  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Realizamos 140 medidas para cada posición de la cabeza, interpolando con un paso fijo (1 cm) entre 0 y 90 grados.

## 7.2.2. Resultados

### Modelado numérico

La Figura 7.5 (a) muestra una vista del modelo de *IRIS* con el disco trasero en el ángulo  $a=45^\circ$  junto con el campo de presión sonora (en dB) para una fuente de 2,3 kHz ubicada 1 m detrás de la escultura. El efecto de focalización es aparente, formando un haz de sonido que exhibe un refuerzo cerca del eje ( $y=0^\circ$ ) que es casi independiente de la distancia a los discos, al menos para distancias inferiores a 1 m. La Figura 7.5 (b) muestra el valor absoluto de la respuesta de frecuencia en función de la posición  $y$  a lo largo de una posición  $x$  fija a 1 m del disco frontal (mostrado como una línea de puntos en la figura 7.5 (a)), en cuatro ángulos diferentes del disco trasero:  $a=0^\circ$ ,  $a=15^\circ$ ,  $a=30^\circ$  y  $a=45^\circ$ .

Es notable que el efecto de focalización depende en gran medida del ángulo del disco trasero. Se observa un claramente una focalización ligeramente por encima de 2,2 kHz, para  $a=0^\circ$ , que se difumina gradualmente para ángulos más altos y se pierde Casi por completo para  $a=30^\circ$ . Para  $a=45^\circ$ , el enfoque se recupera con un efecto máximo cercano a 2,3 kHz.

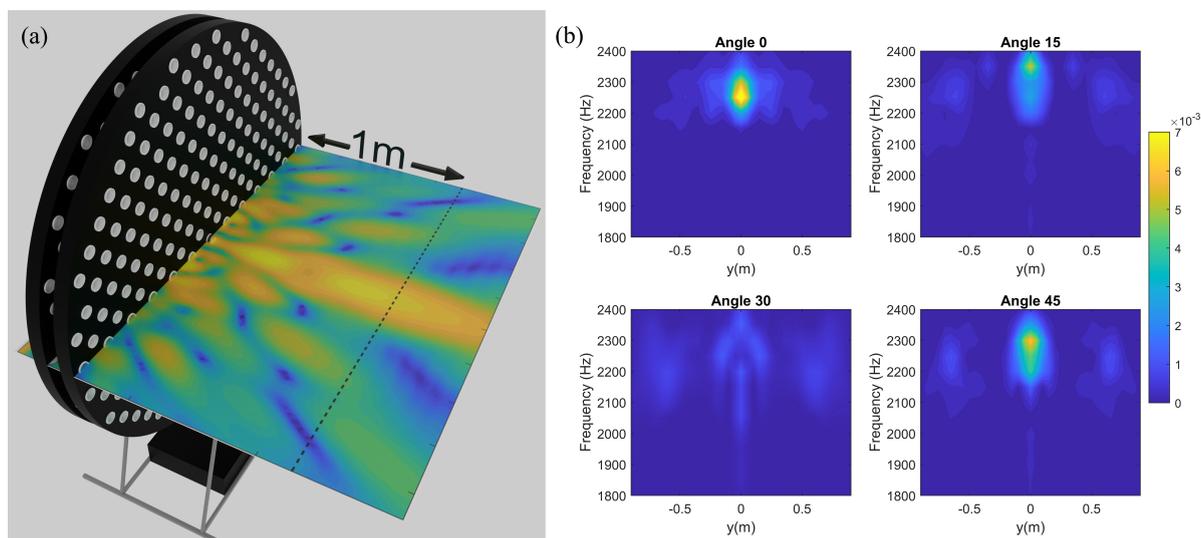


Figura 7.5: (a) Vista del modelo de *IRIS* y del campo de presión sonora (escala en dB) para una fuente de 2,2 kHz 1m detrás de la escultura. (b) Respuesta de magnitud (en dB) en función de la frecuencia y la posición a lo largo de la dirección  $y$  (paralela a los discos) en  $x=1$  m desde el primer disco, para cuatro ángulos del disco trasero en  $a=0^\circ$ ,  $a=15^\circ$ ,  $a=30^\circ$  y  $a=45^\circ$ .

### Medidas acústicas

La figura 7.6 muestra la respuesta de magnitud (dB) en función de la frecuencia y la posición a lo largo de la dirección  $y$  entre -315 mm y 300 mm y  $x=650$  mm, para ángulos  $a=0^\circ$  (panel izquierdo),  $a=15^\circ$  (panel central) y  $a=45^\circ$  (panel derecho). Para  $a=0^\circ$ , se observa un aumento notable en la intensidad del sonido, correspondiente a una focalización alrededor de 2,1 kHz, centrada en la dirección  $y$  en  $y=0$ , que se pierde claramente en  $a=15^\circ$ . Para  $a=45^\circ$  el enfoque se recupera con mayor intensidad, situado ligeramente a la derecha de  $y=0$ , con un efecto máximo cercano a los 2,2 kHz. Nuestros resultados experimentales concuerdan con los derivados de simulaciones numéricas (7.5), en cuanto a que se produce un efecto de focalización por encima de 2 kHz para  $a=0^\circ$ , que se pierde en  $a=15^\circ$  y se recupera fuertemente para  $a=45^\circ$  en una frecuencia ligeramente más alta en el eje central en  $y=0$ . Además, es notable ver que el efecto de enfoque parece depender de la simetría de la estructura (ocurre notablemente para  $a=0^\circ$  y  $a=45^\circ$ , las posiciones angulares de mayor simetría). La amplitud en las figuras 7.6, 7.7 y 7.8 se normalizó con la amplitud máxima de todas las respuestas de

impulso medidas.

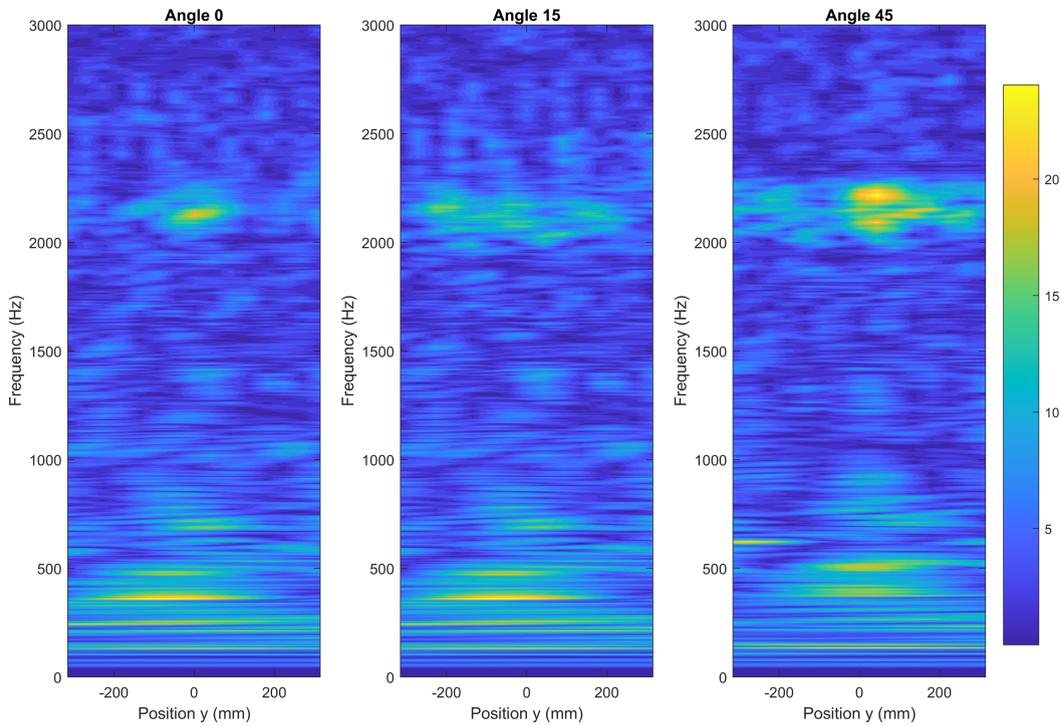


Figura 7.6: Respuesta de magnitud (en dB) en función de la frecuencia y la posición (la amplitud se normalizó con la amplitud máxima) a lo largo de la dirección  $y$  (paralela a los discos) en  $x=650$  mm desde el primer disco, para tres posiciones del disco trasero de *IRIS* en  $a=0^\circ$  (izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (derecha).

La Figura 7.7 muestra el campo de presión sonora (dB) para dos frecuencias (fila superior 2,1 kHz, fila inferior 2,3 kHz) y tres posiciones del disco trasero *IRIS* como se indica en la figura 7.4 (c):  $a=0^\circ$  (columna izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (columna derecha). El panel superior izquierdo muestra un efecto focalización a 2,1 kHz para  $a=0^\circ$  centrado en la dirección  $y$  en  $y=0^\circ$ , en un área de 900 mm X 100 mm. En  $a=15^\circ$  (fila superior, centro) se observa claramente que la energía se concentra en un punto cercano a  $x=1000$  y  $y=0$ , mientras que en  $a=45^\circ$  prácticamente no se observa focalización (fila superior, derecha). Por el contrario, a 2,3 kHz (fila inferior), el efecto se invierte, mostrando una focalización en  $a=45^\circ$  (columna derecha) similar al efecto observado a 2,1 kHz para  $a=0^\circ$  (fila superior, izquierda) pero ligeramente menos estrecho y desplazado de  $y=0$ . En  $a=15^\circ$  (fila inferior,

centro) la energía se concentra nuevamente en  $y=0$  pero esta vez en una región muy estrecha en la dirección  $x$ . El mismo fenómeno se observa en  $a=0^\circ$  pero con menor intensidad (fila inferior, izquierda). Una vez más, nuestras predicciones realizadas a partir de la simulación numérica muestran una concordancia razonable con los resultados experimentales, ya que se observa una focalización por encima de 2 kHz en  $a=0^\circ$ , que se pierde en  $a=15^\circ$  y se recupera fuertemente a una frecuencia ligeramente superior para  $a=45^\circ$ . Estos resultados, cuyo origen podría basarse en el fenómeno de transmisión por acoplamiento entre modos FP de ambos discos, muestran que es posible obtener un efecto de focalización por presencia de *IRIS* entre la fuente sonora y el oyente. Este efecto, que ocurre para un cierto rango de frecuencia y para una región limitada en el espacio, se puede alterar variando el ángulo de rotación relativo entre los discos, lo que confirma que es posible alterar la localización espacial y espectral de la focalización ajustando el ángulo de rotación relativo entre los discos.

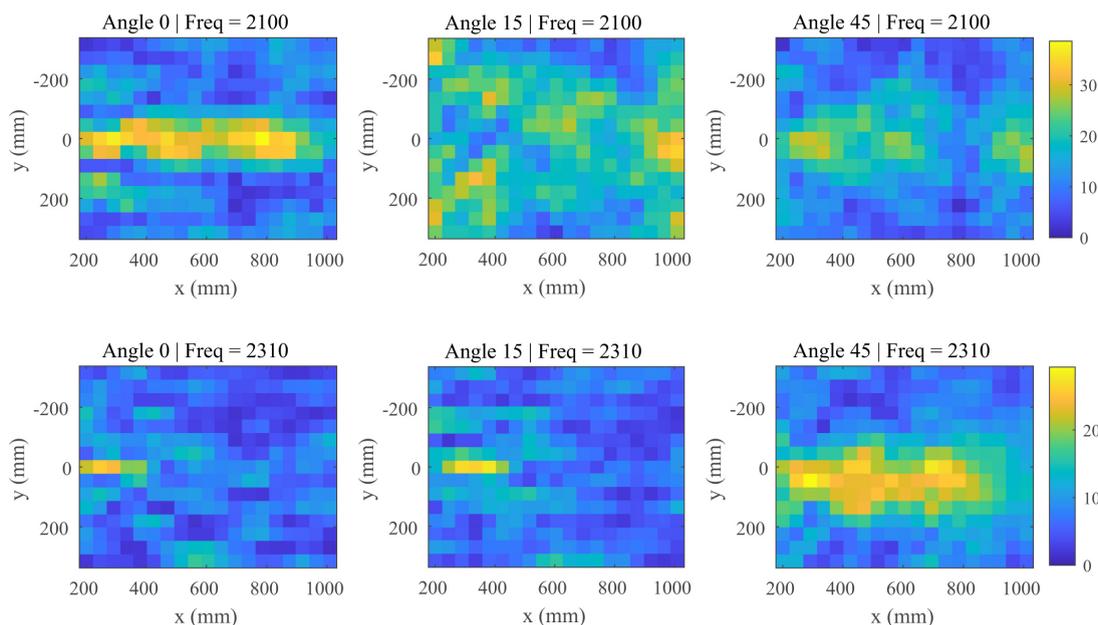


Figura 7.7: Campo de presión sonora (en dB) en el área de medición de 810 mm  $\times$  630 mm (rectángulo amarillo en la Figura 7.4 (a)) para dos frecuencias fijas (2100 Hz fila superior, 2310 Hz fila inferior) y tres ángulos de rotación diferentes  $a=0^\circ$  (columna izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (columna derecha).

## Medidas binaurales

La Figura 7.8 muestra la respuesta de magnitud (dB) obtenida de las medidas binaurales para los oídos izquierdo y derecho (panel izquierdo y derecho, respectivamente), en función de la frecuencia y posición angular del disco trasero *IRIS* entre 0 y 90 grados (eje horizontal), en las posiciones de la cabeza de maniquí *a* y *c* (fila superior e inferior, respectivamente). La medición en la posición *b* se realizó como control y por razones de espacio no se muestra en la figura. Se observa un fuerte aumento de intensidad, correspondiente a un efecto de focalización de sonido en torno a 2,2-2,3 kHz y un ángulo de 45°, en el oído derecho con la cabeza de maniquí ubicada en la posición *a* (panel superior derecho) y en el oído izquierdo con la cabeza ubicada en la posición *c* (panel inferior izquierdo).

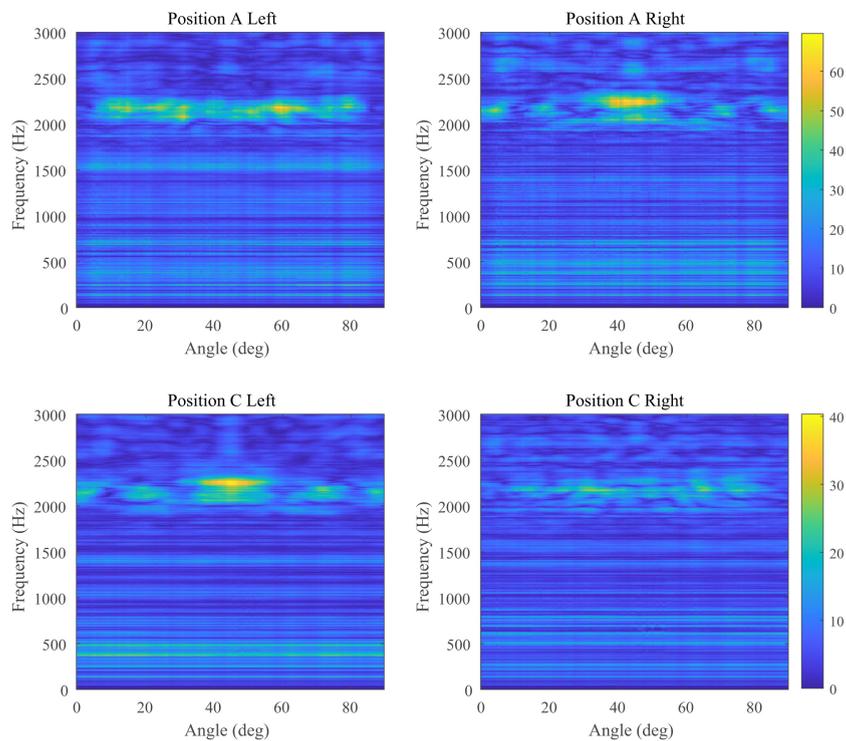


Figura 7.8: Respuesta de magnitud (en dB, amplitud normalizada) obtenida a partir de las medidas binaurales (oído izquierdo, panel izquierdo, oído derecho, panel derecho) en función de la frecuencia y el ángulo, en las posiciones *a* (fila superior) y *c* (fila inferior), como se indica en la 7.4 (a)

Este resultado no solo confirma el efecto de focalización observado en las mediciones acústi-

cas, sino que también nos permite inferir que, para un cierto rango de frecuencia, los discos de *IRIS* generan diferencias entre el nivel de los dos oídos (diferencia de nivel interaural o ILD) a medida que giran. En consecuencia, un sujeto ubicado en las posiciones  $a$  o  $b$  de la cabeza de maniquí oiría que la fuente se desplaza hacia la derecha o hacia la izquierda, respectivamente. Los resultados aquí presentados muestran que es posible controlar dinámicamente las características espectrales y espaciales de las fuentes de sonido en situaciones de interpretación, utilizando *IRIS* en una posición intermedia entre la fuente de sonido y el oyente. También posibilitan la realización de estudios psicofísicos de percepción espacial con estímulos auditivos de origen musical con diferentes características espectrales, algo que ya ha sido explorado por nuestro grupo con un cristal sónico ([103]).

### 7.3. *IRIS* como instrumento para la modulación del timbre y el espacio

A partir de los efectos observados en las medidas de respuesta a impulso binaural, en esta sección queremos mostrar, a través de dos ejemplos de aplicación musical, el uso de *IRIS* como instrumento para modificar de forma controlada el timbre y espacialidad de las fuentes acústicas en situación de performance. El primer ejemplo muestra la posibilidad de modular el timbre y la localización espacial de un tono sostenido en función de la variación continua del ángulo de rotación del disco trasero *IRIS* entre 0 y 90 grados. Para lograr esto, primero se generó un tono centrado en 1.7 kHz usando síntesis FM, con una banda lateral que cae dentro del rango de frecuencia afectado por *IRIS*. Luego, la señal original fue convolucionada con la respuesta al impulso dependiente del tiempo de *IRIS* registrada en la posición  $a$  de la cabeza de maniquí (figura 7.8, fila superior). La Figura 7.9 muestra el espectrograma (en dB a escala completa) para el canal derecho (panel superior) y el canal izquierdo (panel central) y la diferencia de nivel interaural (ILD, panel inferior) calculada a partir de la señal que corresponde al tono sostenido convolucionado con la respuesta a impulso binaural de *IRIS*. Un valor ILD positivo corresponde a un nivel de sonido más alto en el canal izquierdo, mientras que los valores negativos corresponden a un nivel de sonido más alto en el canal derecho. Como era de esperar, se observa un refuerzo a aproximadamente 2,25 kHz, con

desplazamientos en ILD a favor del canal izquierdo alrededor de los segundos 2 y 12 (valores positivos en ILD cercanos a 10 dB) y canal derecho alrededor de 6 y 8 (valores negativos en ILD cercanos a -10 dB) por poco más de 20 dB durante la reproducción. El mismo efecto se observa a 2,1 kHz, con desplazamientos en ILD a favor del canal izquierdo alrededor de 2, 5 y 14 segundos (valores positivos en ILD cercanos a 10 dB).

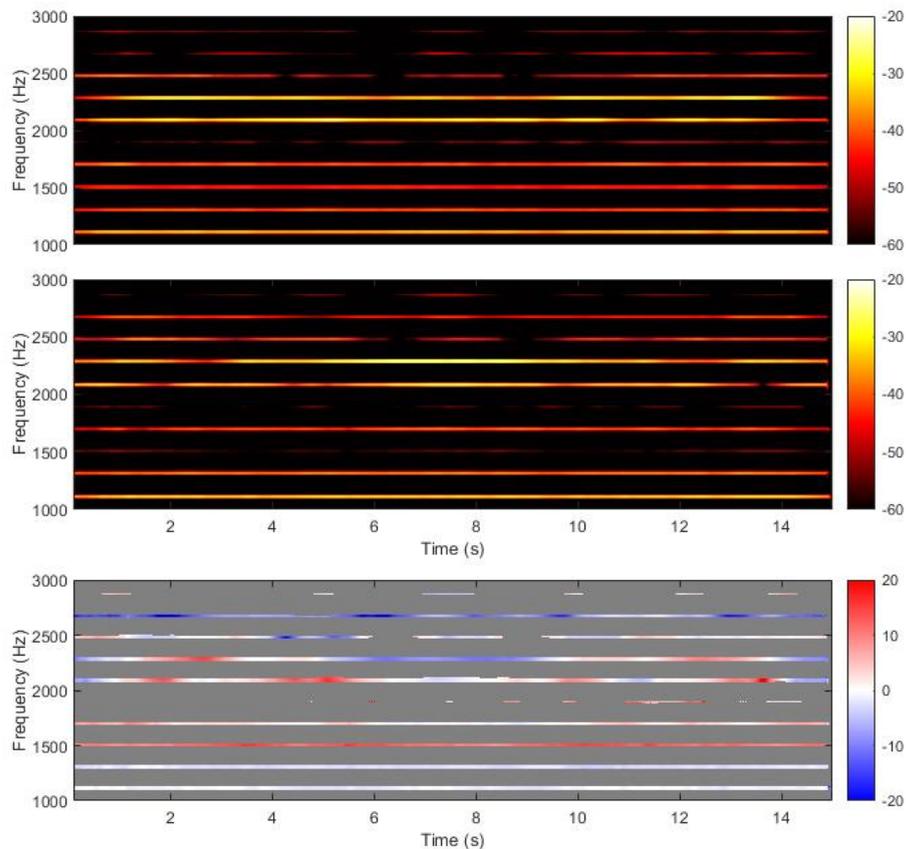


Figura 7.9: Espectrograma (dB a escala completa) para el canal izquierdo (panel superior) y el canal derecho (panel central) y la diferencia de nivel interaural (ILD, panel inferior) calculada a partir de la señal que corresponde al tono sostenido convolucionado con la respuesta de impulso binaural de *IRIS*. Un valor ILD positivo corresponde a un nivel de sonido más alto en el canal izquierdo, mientras que los valores negativos corresponden a un nivel de sonido más alto en el canal derecho.

El segundo ejemplo muestra la posibilidad de reforzar, atenuar y desviar espacialmente ciertos armónicos en una progresión de acordes, cambiando la posición del disco trasero *IRIS*, para modular el color armónico y afectar la percepción espacial segregando los armónicos.

Para probar esta idea, primero se generó una progresión de acordes para dos saxofones tenores y dos saxofones soprano, que consta de siete acordes cuyos tonos fueron elegidos para que las frecuencias de los armónicos 3, 5, 6, 7 y 8 se encuentren dentro del rango de frecuencia afectado por al menos una de las cuatro posiciones del disco trasero de *IRIS* (ver medidas binaurales, capítulo 4). Luego, la señal original fue convolucionada con la respuesta a impulso binaural de *IRIS* grabada en la posición a de la cabeza de maniquí (7.8, fila superior) y en una combinación de cuatro posiciones fijas a 0, 15, 30 y 45 grados del disco trasero de *IRIS*. A partir de la señal obtenida, y con el fin de evaluar los desplazamientos laterales en la ubicación espacial percibida, calculamos el ILD para los armónicos individuales, entre 1 y 3 kHz.

El panel a de la Figura 7.10 muestra la progresión de acordes original con sus correspondientes símbolos de acordes (sistema de cuatro pentagramas, abajo). En el pentagrama doble en la parte superior, se muestran los tonos correspondientes a los armónicos reforzados separados por canal (canal izquierdo, arriba, canal derecho, abajo) y se indica la posición del disco (ángulo). Entre paréntesis, junto a cada cabeza de nota se indica la relación interválica con la raíz del acorde respectivo. La partitura se anota en el tono de concierto excepto por los armónicos, que suenan dos octavas más arriba que lo que están escritas. El panel b de la Figura 7.10 muestra, utilizando un código de color, la diferencia de nivel interaural (ILD) para cada armónico reforzado selectivamente correspondiente al acorde alineado verticalmente (entre 1 y 3 kHz).

Como observamos en las medidas experimentales, *IRIS* afecta el rango de frecuencia entre 2090 y 2350 Hz, donde se ubican los tonos C7 (2093 Hz), C $\sharp$ 7 (2217 Hz) y D7 (2349 Hz). En las mediciones binaurales dependientes del ángulo (figura 7.8, fila superior) mostramos que cada posición afecta a un armónico particular: la posición de 0° refuerza el armónico del tono C7 (2093 Hz) y lo desplaza al canal derecho, la posición de 15° refuerza el armónico del tono C $\sharp$ 7 (2217 Hz) y lo desplaza al canal izquierdo, y la posición de 30° refuerza los armónicos de los tonos C7 (2093 Hz) y C $\sharp$ 7 (2217 Hz) y los desplaza al canal izquierdo. Por último, la posición de 45° refuerza el armónico del tono D7 (2349 Hz) y lo desplaza al canal derecho.

Entonces, como se indica en el panel a) de la figura 7.10, en el primer compás giramos el disco 15° para reforzar la intensidad armónica del tono C $\sharp$ 7 en el canal izquierdo, y así completar la tríada menor F $\sharp$ , A, C $\sharp$ . Manteniendo el disco a 15°, la intensidad armónica de

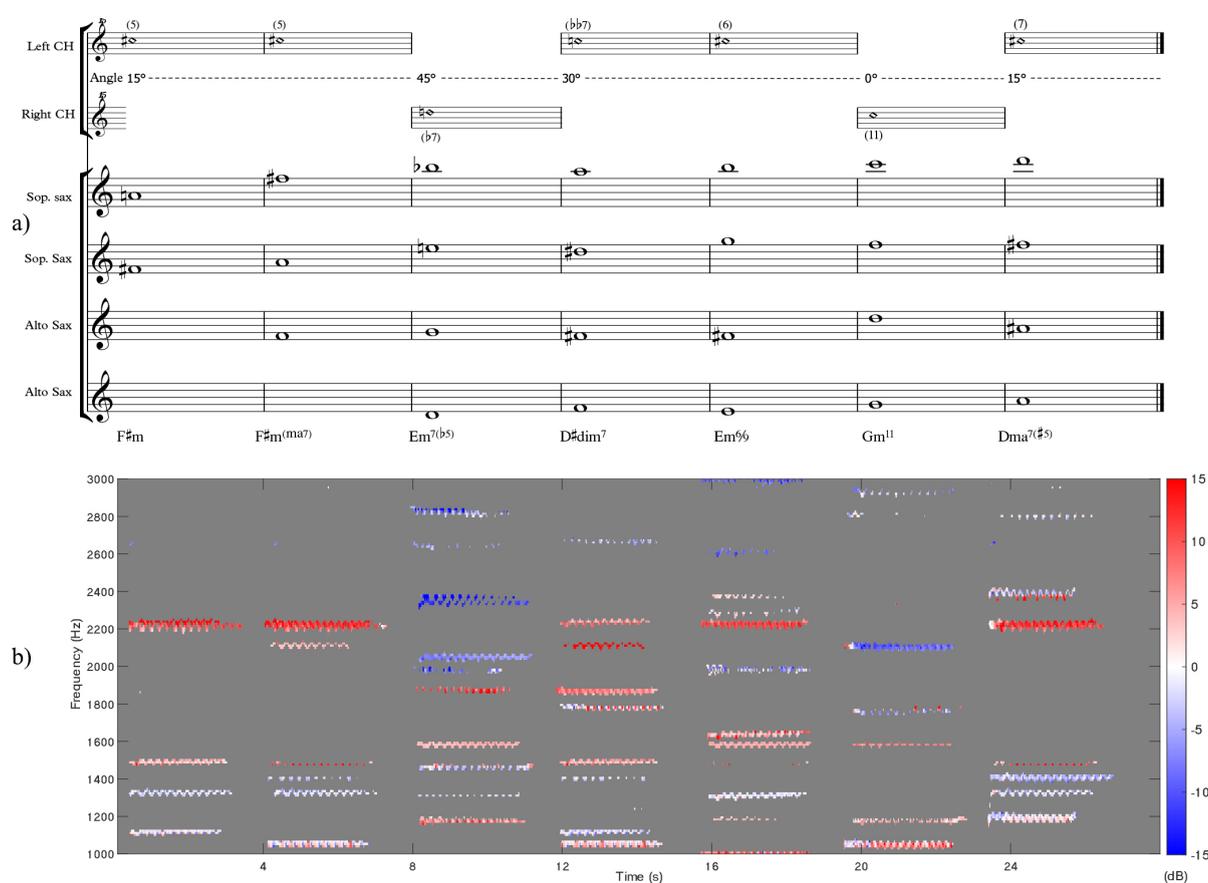


Figura 7.10: (a) Progresión de acordes (sistema de cuatro pentagramas, abajo) y tonos (pentagrama doble, arriba) correspondientes a los armónicos reforzados por *IRIS*, separados por canal (canal izquierdo, arriba, canal derecho, abajo). Entre paréntesis, al lado de cada cabeza de nota se indica la relación interválica con la tónica del acorde respectivo. La línea punteada indica la posición del disco medida en grados (ángulo). La partitura está anotada en tono de concierto, excepto los armónicos reforzados, que suenan dos octavas más altos que lo escrito. (b) ILD para cada armónico reforzado selectivamente correspondiente al acorde alineado verticalmente (entre 1 y 3 kHz).

C#7 todavía se refuerza en el compás dos, constituyendo la tríada aumentada F, A, C#. Al tocar el tono F#, el acorde se modula a una sonoridad que sugiere un color característico de séptima menor-mayor: la tríada menor F#, A, C# con una séptima mayor añadida (F). Este efecto se puede observar al comienzo de la progresión y alrededor del segundo 4 en el panel b de la figura 7.10, como un aumento de intensidad de al menos 10 dB a 2,2 kHz a favor del canal izquierdo.

En el panel a), compás 3 de la misma figura, tenemos E, G, Bb, D, la tríada disminuida sobre E con la séptima menor D, formando un acorde de mi séptima menor (Em7) con una quinta bemol (b5). Al mover el disco a la posición de 45°, reforzamos la intensidad armónica del tono D7 en el canal derecho, y así enfatizamos la séptima menor (b7). El panel b) muestra este efecto alrededor del segundo 8 como un aumento en la intensidad de al menos 10 dB a 2350 Hz a favor del canal derecho.

En el panel a) compás 4, tenemos la tríada disminuida D#, F#, A. Al girar el disco 30°, realzamos la intensidad armónica del tono C7 en el canal izquierdo, y así obtenemos el acorde de séptima disminuida (dim) D#, F#, A, C. Debido a que el tritono A, D# está presente, D#dim7 funciona aquí como un sustituto relativo del acorde de séptima dominante construido sobre B, que tiene una tendencia a resolver en el acorde de E menor que sigue en la progresión. En este contexto, la C agregada contribuye a crear más tensión al incorporar la novena bemol (b9). Este efecto se puede observar en el panel b) alrededor del segundo 12 como un aumento en la intensidad de al menos 10 dB a 2,1 kHz a favor del canal izquierdo.

En el panel a) compás 5, tenemos E, G, B, F#, un acorde de E menor con una novena añadida (add9). Al mantener el disco a 30°, reforzamos la intensidad del armónico del tono C#7 en el canal izquierdo, por lo que el acorde Em (add9) se convierte en un acorde Em6/9 (el tono C# corresponde a una sexta mayor relativa a la raíz E). Este efecto se muestra en el panel b) a los 16 segundos, como un aumento de intensidad de al menos 10 dB a 2,2 kHz, a favor del canal izquierdo.

En el panel a) compás 6, tenemos G, D, F, C, el acorde de séptima menor de G con la tercera omitida y la undécima agregada. Al girar el disco a la posición de 0°, reforzamos la intensidad armónica del tono C7 y, por lo tanto, enfatizamos la undécima (11) en el acorde. El panel b) muestra este efecto alrededor de 20 segundos, como un aumento de intensidad de al menos 10 dB a 2,1 kHz, a favor del canal derecho.

Finalmente, en el panel a) compás 7, tenemos la tríada mayor D, F#, A con una quinta aumentada agregada (A#). Al girar el disco a la posición de 15° reforzamos la intensidad armónica del tono C#7, y así obtenemos un color característico de un acorde de séptima mayor (C#) y quinta aumentada (A#). Este efecto se puede observar en el panel b) alrededor del segundo 24 como un aumento en la intensidad de al menos 10 dB a 2,2 kHz, a favor del canal izquierdo.

Es importante aclarar que, debido a que privilegiamos el color armónico sobre la funcionalidad del acorde, los símbolos de acordes usados en esta progresión deben entenderse como una sugerencia más que como una versión definitiva.

En resumen, la posibilidad de amplificar y direccionar la energía acústica de forma controlada, como provocar cambios en la localización de las fuentes sonoras, nos permite formular el concepto de *IRIS* como una escultura sonora que tiene lugar en el espacio “fuera” de la escultura. En otras palabras, *IRIS* actúa no solo en una región específica del espectro de frecuencias sino en una región limitada del espacio, que como hemos visto en la sección anterior, se puede controlar variando la rotación de los discos. Estas características permiten considerar a *IRIS* como un dispositivo que actúa simultáneamente sobre la materialidad y espacialidad del sonido, teniendo la capacidad de amplificar y atenuar de forma controlada determinadas frecuencias en regiones específicas del espacio, como si estuviéramos esculpiendo el sonido.

## 7.4. Test de escucha on-line

Se realizó un test de escucha on-line para evaluar el efecto de *IRIS* en la pieza para saxofón estudiada en la sección anterior. En el experimento participaron once sujetos, quienes fueron seleccionados por su interés y grado de habilidad en interpretación, composición y producción musical con tecnologías de audio. El test consistió en una única sesión de aproximadamente quince minutos, dividida en tres bloques. En el primer bloque, a cada participante se le presentaron dos versiones del estudio para saxofones en orden aleatorio, una grabada con *IRIS* y la otra sin *IRIS*. Luego se les indicó que comparen ambas versiones y establecieran diferencias cualitativas y cuantitativas entre las dos. En el segundo bloque, se les indicó que escucharan la versión grabada con *IRIS*, y luego se les pidió que marcaran en la forma de onda los puntos donde escuchan cambios en la ubicación espacial o lateralización del sonido. Finalmente, en el tercer bloque se les pidió que eligieran una de las tres configuraciones espaciales posibles: *IRIS* entre los instrumentos y el oyente, *IRIS* delante del oyente e *IRIS* en uno de los laterales. Se puede acceder a la prueba de escucha desde la siguiente dirección <http://lapso.org/waet/testdispositivo.html>

Los resultados de la sesión 1 revelaron que la versión grabada con *IRIS* tiene mayor riqueza

espectral en región de baja frecuencia, según lo informado por dos de los evaluadores. Cuatro evaluadores reportaron atenuación en alta frecuencia y un sonido “amortiguado” menos brillante. La sala fue descrita como un ambiente acústicamente seco, con poca reverberación, y el sonido producido por los instrumentos se consideró que tenía un sonido más natural y “limpio”, según lo reportado por dos evaluadores. Un evaluador expresó un “sentimiento de intimidad, como en un concierto de música de cámara”. En la versión grabada sin *IRIS*, dos sujetos reportaron una reverberación en alta frecuencia y un “sonido más brillante”. También informaron haber percibido una “apertura espacial más amplia” y escuchar que los instrumentos “se abren espacialmente”.

Los resultados de la sesión 2 revelaron cambios en la ubicación espacial o lateralización al comienzo de cada compás, según lo reportado por la mayoría de los evaluadores. Como esperábamos, al comienzo del compás 2 (segundo 4), dos evaluadores reportaron lateralización hacia la izquierda. En contraste, al comienzo del compás 3 (segundo 8), dos evaluadores reportaron lateralización hacia la derecha. Nuevamente, al comienzo del compás 5 (segundo 16) y del compás 7 (segundo 24), dos evaluadores reportaron lateralización hacia la izquierda. Estos resultados son consistentes con la lateralización ILD a 2.2 y 2.3 kHz observada en las mediciones experimentales analizadas en las secciones 7.2.2 y 7.3.

Los resultados de la sesión 3 mostraron una inclinación hacia la imagen b, asociada con el sonido que parece venir de atrás, o que los instrumentos se escuchan detrás de la cabeza, según lo reportado por 4 evaluadores. Por otro lado, 2 evaluadores se inclinaron hacia la imagen a, notando una reducción en alta frecuencia, efecto que asociaron con la interferencia de la escultura. Otro evaluador, que también eligió la imagen a, informó percibir que el sonido parece provenir de ambos lados, por lo que concluyó que *IRIS* está al frente, interfiriendo entre la fuente y él mismo.

En resumen, aunque se trata de una evaluación preliminar y no puede generalizarse, las respuestas del test psicofísico confirman desde el aspecto perceptual los resultados anticipados de las medidas acústicas binaurales.

## 7.5. *Iridiscente*

La primera versión de *IRIS* fue *Iridiscente*, una obra de 2016 que surgió como una aproximación al uso de materiales compuestos periódicos en una escultura. La obra trabaja el vínculo entre la luz y el sonido como dos fenómenos análogos. Se inspira en un trabajo [79] del físico Trevor Cox, el cual explora la posibilidad de construir un dispositivo que altere las ondas sonoras, de forma similar a las estructuras de la naturaleza que actúan sobre la luz para producir la iridiscencia óptica.

*Iridiscente* está formada por dos discos perforados con una red de orificios que rotan de manera independiente. Se proyecta un haz de luz en los discos, que al atravesar los orificios genera la proyección de múltiples siluetas dibujadas en una pared. Una cámara capta la proyección y utiliza la información visual para procesar el sonido. A su vez el público puede interferir la cámara y modificar la información de luz captada, alterando simultáneamente lo que se ve y lo que se escucha. La figura 7.11 muestra una imagen de la escultura en funcionamiento, donde se pueden apreciar los discos y las sombras proyectadas en la pared.

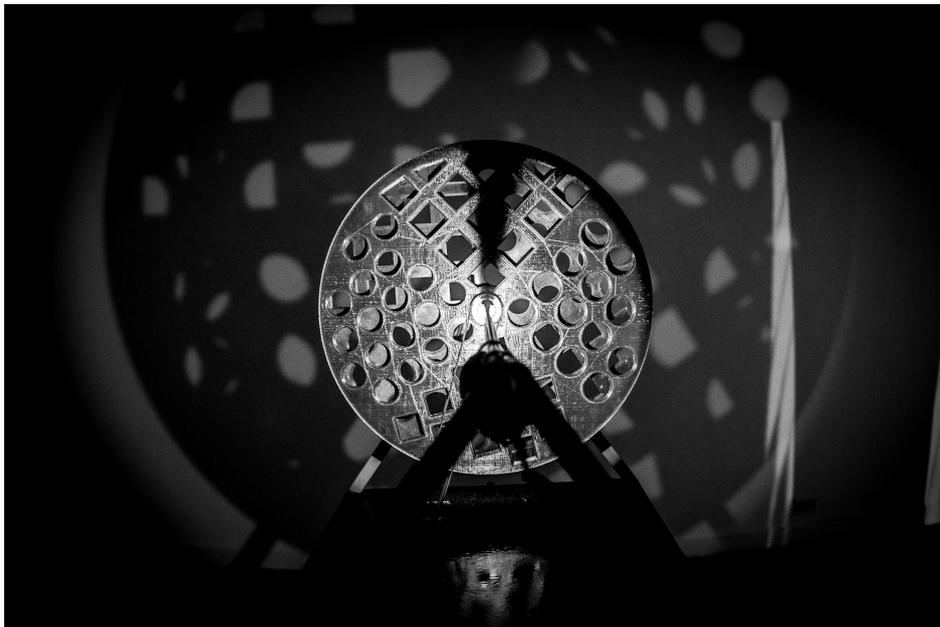


Figura 7.11: *Iridiscente* en funcionamiento en FASE 8, Centro Cultural Recoleta (Noviembre/Diciembre 2016). Foto: Max Edelstein

La obra funciona utilizando un programa escrito en OPENCV cargado en una computadora Raspberry Pi 3 (Raspi3) con cámara incorporada que detecta la posición y el tamaño

de las siluetas proyectadas y les asigna una variable numérica. Cada registro de la cámara es procesado por OPENCV y enviado a otra computadora Raspi3 con Pure Data (PD), un entorno de programación visual de código abierto. PD asigna cada variable al tono, intensidad y brillo de 20 osciladores con frecuencias fijas que varían en relación de cuartos de tono. El movimiento de los motores está controlado por una placa Arduino Duemilanove con motor shield, que ejecuta un algoritmo probabilístico que toma como entrada un sensor de proximidad, el cual detecta objetos que se aproximan desde un costado de la escultura. Esta descripción se puede ver de manera gráfica en el diagrama de la figura 7.12.

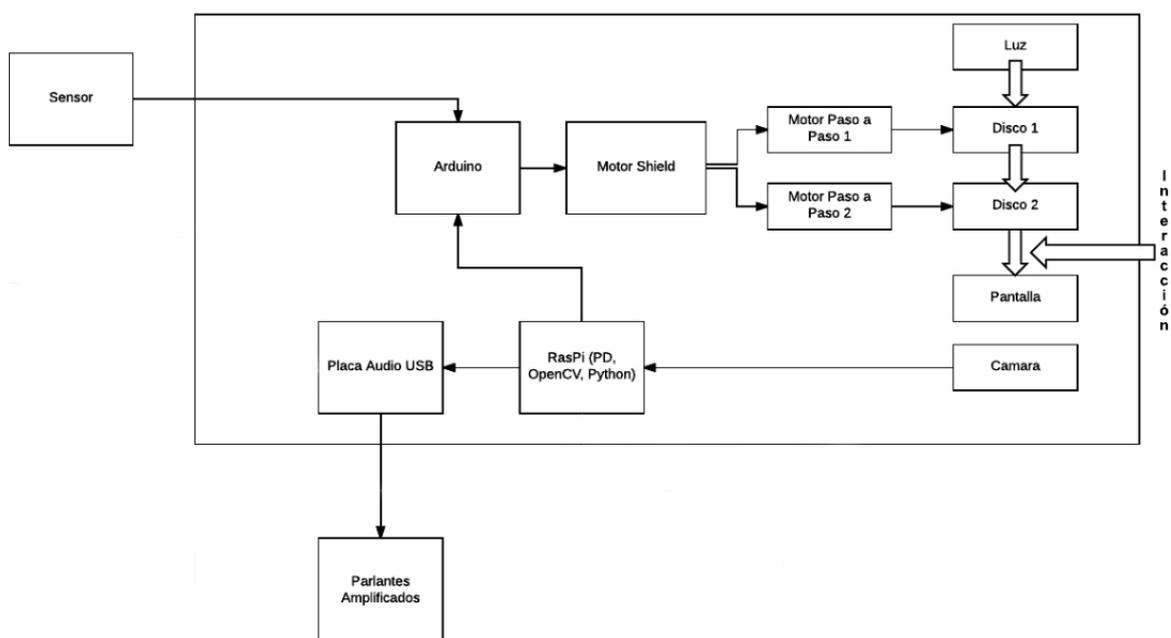


Figura 7.12: Diagrama que ilustra el funcionamiento de *Iridiscente*

Los discos fueron fabricados en PLA con tecnología de impresión 3D. El mecanismo de rotación fue diseñado con un sistema de poleas y correas unidas a motores paso a paso. Como fuente de luz se utilizó una linterna con LED Cree más lente convergente.

*Iridiscente* se presentó en el marco de la muestra de arte, ciencia y tecnología FASE 8, realizada en el Centro Cultural Recoleta entre el 29 de noviembre y el 18 de diciembre de 2016. El desarrollo técnico de la obra estuvo a cargo de Manuel Eguía.

## 7.6. *IRIS: Fases Múltiples*, una instalación interactiva de luz y sonido

La posibilidad de generar el efecto de una modulación del color tímbrico en el espacio motivó el desarrollo de un soporte visual para *IRIS*, lo que llevó a la realización de una instalación interactiva que llamamos *IRIS: Fases Múltiples*. La instalación explora el movimiento desde una perspectiva visual y acústica, como dos fenómenos que interactúan de manera análoga en un espacio de proyección externo a la escultura. A medida que los discos de *IRIS* giran, filtran el sonido e interfieren con la transmisión de la luz. Una cámara y un micrófono registran las variaciones en las propiedades de color de la luz y la frecuencia e intensidad del sonido generado por *IRIS*, e imprimen las cualidades del estímulo visual en el sonoro y viceversa. Esta idea es la que se ilustra en el esquema de la figura 7.13.

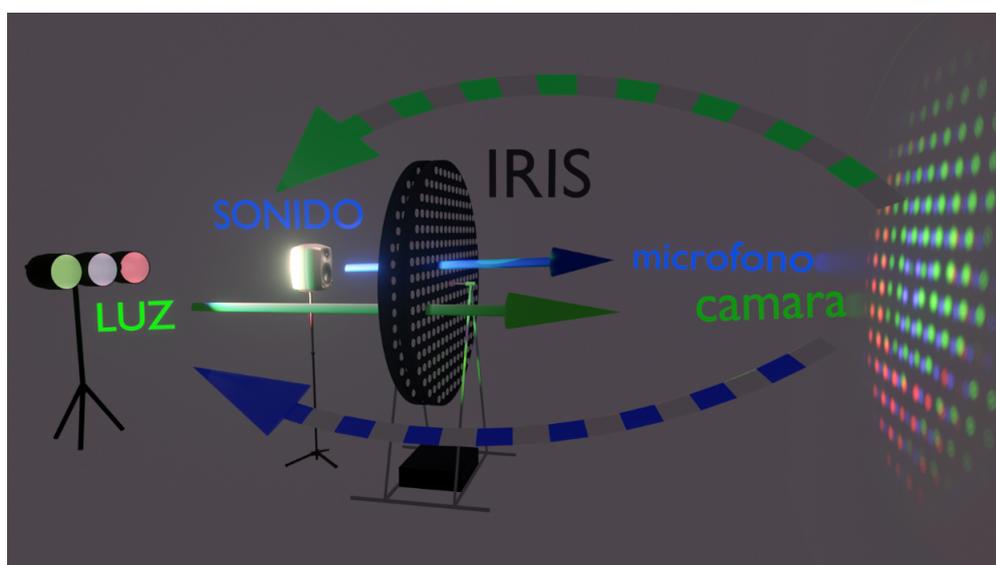


Figura 7.13: *IRIS Fases Múltiples* es una instalación interactiva que conecta el aspecto visual con el sonoro. Por un lado está *IRIS*, una escultura sonora formada por dos discos perforados que al rotar filtran el SONIDO e interfieren la transmisión de LUZ. Por el otro, una cámara y un micrófono registran las variaciones en las propiedades del color de la luz y de frecuencia e intensidad del sonido generadas por *IRIS*, e imprimen las cualidades del estímulo visual en el sonoro y viceversa (Texto curatorial original)

A su vez, las formas en movimiento y los patrones de color que proyecta la luz al atravesar

la escultura, refuerzan el efecto del movimiento sonoro en el espacio. Al recorrer la instalación el público escucha, en función de su posición con respecto a *IRIS*, una secuencia predefinida de notas cuya frecuencia e intensidad varía según los cambios generados en el color y el brillo de la luz. Simultáneamente, las variaciones que se producen en el sonido generan alteraciones en el color e intensidad de la luz. Como apoyo visual, utilizamos tres reflectores LED ubicados detrás de la escultura y una cámara que capturó la proyección de luz interferida por los discos móviles de *IRIS*. De esta forma, usamos las variaciones registradas en el tono, la saturación y la luminosidad de los colores de la luz para controlar la desviación en frecuencia, la resonancia de un filtro y la envolvente de amplitud de una secuencia predefinida de sonidos tónicos. Al mismo tiempo utilizamos un micrófono en la posición donde se produce el enfoque del sonido, para captar las variaciones de intensidad y modificar la tonalidad de la luz en función de estas variaciones. La obra fue presentada el 2 de noviembre de 2019 en el Centro Cultural de la Ciencia de Buenos Aires, como encargo para el evento “La Noche de los Museos 2019”. En la figura 7.14 se puede ver una fotografía de *IRIS* durante una de las performances con video mapping y guitarra eléctrica.



Figura 7.14: *IRIS* durante una performance con video mapping y guitarra eléctrica procesada de Federico Joselevich Puiggrós y Leonardo Salzano. La Noche de los Museos 2019, 2 de noviembre, Centro Cultural de la Ciencia de Buenos Aires. Foto: Ezequiel Hilbert

## Parte III

# Conclusiones



# Conclusiones generales

En la presente tesis se estudiaron dos aplicaciones para el modelado de fuentes acústicas a través de materiales compuestos periódicos: la creación de un cristal sónico de geometría variable como extensión acústica de un instrumento musical; y la creación de una escultura basada en una malla doble acústica como un instrumento para modular el timbre en el espacio.

En el capítulo 5 se presentó un cristal sónico (CS) configurable, el cual, ubicado entre la fuente de sonido y la audiencia, es capaz de modificar en gran medida el timbre y el patrón de directividad de la fuente durante la interpretación, actuando como una extensión acústica de un instrumento musical. Primero se llevó a cabo un estudio exploratorio para obtener la respuesta en frecuencia de toda la sala, utilizando diferentes configuraciones del CS y variando la posición de la fuente. Para este estudio se desarrolló una herramienta interactiva mediante un esquema de elementos finitos 2D basado en la API de COMSOL. Mediante este análisis se identificaron tres patrones espaciales distintivos con un aumento de la intensidad en dos bandas de focalización y una disminución de la intensidad para la banda prohibida del CS. Luego se seleccionaron tres configuraciones simples que exhiben estos comportamientos y se evaluó el efecto sobre el campo acústico mediante grabaciones binaurales de dos instrumentos ubicados en tres posiciones detrás del CS, y el cálculo de dos magnitudes: la intensidad binaural (BI) y la diferencia de nivel interaural (ILD).

Se realizó un primer análisis mostrando los cambios en la BI y en la ILD de los armónicos de una secuencia de siete notas predefinidas en dos configuraciones del CS y dos posiciones seleccionadas para cada instrumento. En estas magnitudes se encontró, para cada secuencia de siete notas, registrada en una posición particular y para una configuración dada, un refuerzo o desplazamiento significativo en los armónicos en un promedio de cuatro notas,

como se predijo. Por último, se mostraron los cambios en la ILD en una secuencia de gestos (transiciones entre las configuraciones) mientras el músico tocaba una nota larga en el mismo lugar que antes. Si bien se demostró que el CS es un instrumento que es capaz de modificar las características espaciales y tímbricas de una fuente acústica reforzando o desviando la propagación de sus armónicos, la expresión más convincente se obtuvo variando su configuración durante la ejecución de una nota (realizando lo que llamamos un gesto de cristal sónico).

En el capítulo 7 se propuso satisfactoriamente un caso de aplicación de una malla doble acústica con ajuste de rotación angular para modelar la espacialidad y el timbre de las fuentes acústicas en una situación de performance. La propuesta consiste en el diseño y construcción de *IRIS*, una escultura formada por dos discos con perforaciones periódicas que pueden girar de forma independiente, y desarrollada por nuestro grupo para trabajar en el espectro de frecuencias relevante para la música. De esta manera se mostró experimentalmente la posibilidad de modular la ubicación espacial y espectral de la emisión de fuentes acústicas y de generar cambios en la diferencia de nivel interaural (ILD) en función del ángulo de rotación de los discos. Luego mostramos este efecto como una modulación espacial del color armónico de un tono sostenido sintetizado y como una modulación selectiva de los armónicos de los acordes de una progresión. Finalmente, realizamos una prueba de escucha para evaluar perceptivamente el efecto de *IRIS* en la progresión de acordes. Para ello, seleccionamos 11 sujetos según su experiencia y habilidad en composición, interpretación musical y tecnologías de sonido. A partir de los resultados preliminares de esta prueba, y de acuerdo con los resultados anticipados de las mediciones acústicas, podemos confiar en que *IRIS* puede funcionar como una escultura de sonido que permite modelar el timbre en el espacio por medios puramente acústicos en una situación de interpretación.

Para completar la caracterización del efecto del cristal sónico e *IRIS* en la localización de las fuentes sonoras, se deben realizar más investigaciones que involucren aspectos perceptuales. Además queda pendiente mejorar la interacción de estos dispositivos con el performer, por ejemplo mediante el uso de sistemas interactivos basados en sensores o controladores. En un contexto musical, esta mejora puede resultar de interés para los compositores e intérpretes, permitiéndoles tener un mayor dominio de las configuraciones (gestos) y así reforzar, atenuar o desviar dinámicamente la propagación de ciertos armónicos. Para que esto resulte

viable, se requieren mejoras en los mecanismos de control, por ejemplo, optimizar la transmisión mecánica del motor a los discos de *IRIS*. Al posicionar los discos (o las columnas, en el caso del cristal) de forma individual es posible variar la geometría (y por ende las propiedades acústicas) de forma sumamente versátil y lograr un amplio repertorio de “gestos” que pueden incorporarse a la performance. De esta manera se busca que el músico desarrolle tanto una intuición acerca de las proyecciones de la nueva extensión de su instrumento (posiblemente proporcionándole algún retorno del campo sonoro del otro lado del cristal o *IRIS*) como de ir desarrollando un sistema de codificación que permita ordenar el nuevo repertorio de gestos.

## Parte IV

## Apéndices

# Apéndice A

## Geometría de estructuras periódicas en dos dimensiones

Un sistema periódico es una red infinita o distribución periódica de puntos en el espacio, también llamada estructura cristalina. Un tipo especial de red que se toma como punto de partida para el estudio de sistemas periódicos es la *red de Bravais*, la cual se define como una red discreta de puntos cuya ubicación es invariante en las traslaciones y, en la mayoría de los casos, en las rotaciones. Matemáticamente, una red de Bravais bidimensional (que es el caso que alcanza la presente tesis) se define como una colección de puntos con vectores posición  $\vec{R}$  como

$$\vec{R} = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2 \quad (\text{A.1})$$

donde  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  son los vectores traslacionales en dos dimensiones y  $n, m$  son enteros arbitrarios.

Para la red cuadrada tenemos

$$a_1 = a\hat{x}, a_2 = a\hat{y} \quad (\text{A.2})$$

siendo  $a$  el parámetro de red.

El paralelepípedo definido por los vectores traslacionales se conoce como *celda primitiva*,

que es un caso particular de celda unidad. La celda primitiva se define como el área que contiene exactamente un punto de la red y se puede trasladar a toda la red de Bravais sin dejar espacios vacíos ni solapamientos. La celda primitiva que tiene la simetría completa de la red se conoce como la celda de *Wigner-Seitz*, que asociada a un punto de la red, tiene la propiedad de estar más cerca de ese punto que de cualquier otro. La misma se construye dibujando líneas que conectan puntos adyacentes de la red, bisecando con un plano cada línea y tomando el poliedro más pequeño delimitado por ese plano. La traslación de la celda unidad siguiendo los vectores  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  en el espacio directo (real) conforma la red  $\vec{R}$  *directa* del sistema periódico bidimensional. La figura A.1 ilustra en (a) la sección de una red cuadrada con los vectores traslacionales  $a_1$  y  $a_2$  en el espacio directo (red directa), y en (b) la celda unidad con parámetros de red iguales a  $a$ . De esta manera, la estructura cristalina se construye a partir de inclusiones idénticas unidas a cada punto de la red, que en nuestro caso corresponden a dispersores acústicos.

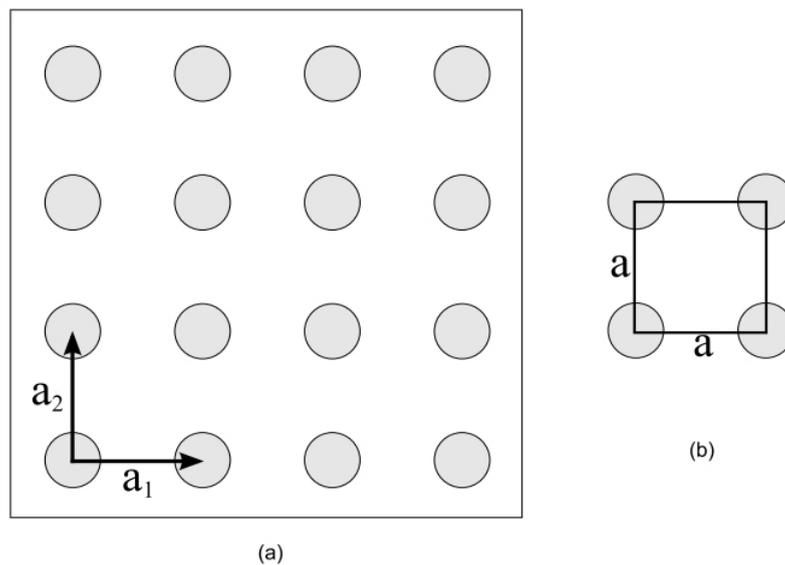


Figura A.1: Esquema de una red puntual bidimensional en el espacio directo (red directa): (a) sección de una red cuadrada con vectores primitivos  $a_1$  y  $a_2$ , (b) su correspondiente celda unitaria con parámetros de red iguales a  $a$ . Extraído de Zapata [86]

Asociado a la red directa, existe el concepto de *red recíproca*, asociada al espacio recíproco, la cual es relevante para el estudio de la propagación de ondas en un medio periódico. Una red recíproca se define como el conjunto de todos los vectores de onda  $\vec{G}$  que tienen la

periodicidad de la red. Matemáticamente  $\vec{G}$  pertenece a la red recíproca  $\vec{R}$  si es cierto que

$$e^{(i\vec{G}\cdot(\vec{r}+\vec{R}))} = e^{(i\vec{G}\cdot\vec{r})} \quad (\text{A.3})$$

para todo  $r$  y para todos los puntos de  $\vec{R}$ . A partir de la expresión 5.2 surge que una red recíproca es el conjunto de puntos cuyas posiciones son vectores de onda  $\vec{G}$  que satisfacen

$$e^{(i\vec{G})\cdot\vec{R}} = 1 \quad (\text{A.4})$$

La red recíproca también constituye una red de Bravais cuyos vectores primitivos  $\vec{b}_1$  y  $\vec{b}_2$  están construidos a partir de los vectores primitivos de la red directa  $\vec{a}_1$  y  $\vec{a}_2$  según las siguientes expresiones:

$$b_1 = 2\pi \frac{(x \times y - y \times x)a_2}{a_1(x \times y - y \times x)a_2} \quad (\text{A.5})$$

$$b_2 = 2\pi \frac{(y \times x - x \times y)a_1}{a_2(y \times x - x \times y)a_1} \quad (\text{A.6})$$

La celda de Wiegner-Seitz en la red recíproca se conoce como la *primera zona de Brillouin* (BZ). La celda de BZ está delimitada por planos en el espacio de vectores (planos de *Bragg*) que bisecan a los vectores primitivos de la red recíproca. La figura A.2 (a) muestra la sección de una red cuadrada en el espacio recíproco y la celda de Wiegner-Seitz en línea punteada, y (b) la celda unitaria o primera zona de Brillouin (BZ). La BZ es de gran importancia en teoría de sólidos con estructuras periódicas ya que la periodicidad permite describir las propiedades del sólido dentro de esta zona. Además, la BZ presenta direcciones de alta simetría, que se suelen escribir como  $\Gamma X$  y  $\Gamma M$ .

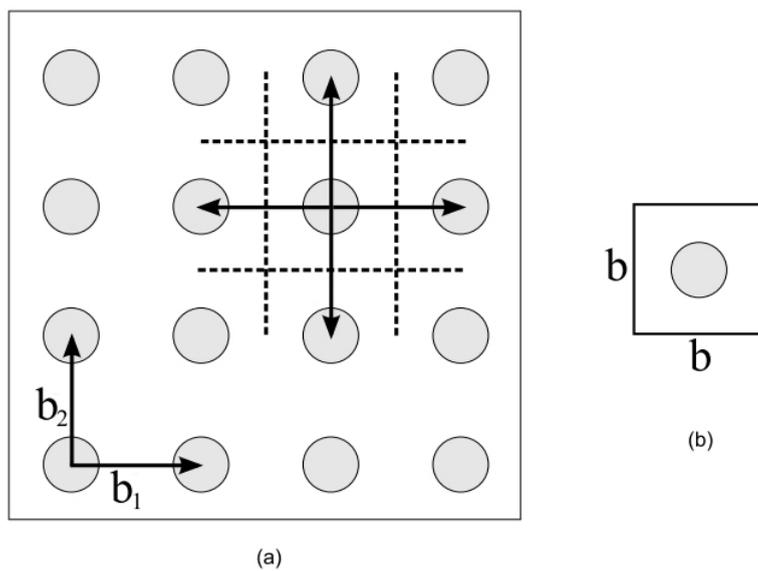


Figura A.2: Esquema de una red puntual bidimensional en el espacio recíproco (red recíproca): (a) sección de una red cuadrada con vectores primitivos  $b_1$  y  $b_2$  y construcción de una celda de Wigner-Seitz, (b) su correspondiente celda unitaria o primera zona de Brillouin. Extraído de Zapata [86]

# Apéndice B

## Propagación de ondas en un medio periódico

El estudio de las propiedades de dispersión de las ondas en sólidos responde a su estructura de bandas, es decir, a la relación entre los modos de propagación dentro del medio y sus relaciones de dispersión. En medios periódicos, las características de propagación de una onda están dadas por las propiedades geométricas y dependen de la periodicidad de la red. Una onda que se propaga en un medio periódico se comporta como una función de onda que es una especie particular de onda plana pero con una modulación periódica, y esa modulación tiene la escala de la red. En efecto, según el teorema de Bloch [9], la solución a la ecuación de onda en un sistema periódico puede ser descrita como una onda plana,  $e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$  modulada por una función  $\psi_{\vec{k}}(\vec{r})$  que tiene la periodicidad de la red. Matemáticamente:

$$\theta_{\vec{k}}(\vec{r}) = e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}} \psi_{\vec{k}}(\vec{r}) \quad (\text{B.1})$$

donde  $\psi_{\vec{k}}$  corresponde a la función de Bloch y  $\vec{k}$  es el vector de Bloch.

Como la función de Bloch cumple para todos los vectores de la red directa  $\vec{R}$  que:

$$\psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = \psi_{\vec{k}}(\vec{r} + \vec{R}) \quad (\text{B.2})$$

entonces la distribución del campo es básicamente la misma en cada celda unidad de la red

directa. Esto implica que, aplicando las condiciones de contorno adecuadas, la solución al problema está restringida a una única celda en la red directa. asimismo, como la función de Bloch para un vector  $\vec{k}$  es la misma que  $\vec{k} + \vec{G}$  en la red recíproca, al incrementarse en  $\vec{G}$ , la fase se incrementa en  $\vec{R} \cdot \vec{G} = 2n\pi$ , siendo  $n$  un entero. Entonces la fase se mantiene constante y se dice que, en la red recíproca, el cálculo está restringido a la primera zona de Brillouin (BZ).

Consideremos ahora la ecuación de onda en el campo libre con dependencia armónica temporal de  $e^{(i\omega t)}$

$$\nabla^2 p(x, y, z) + \frac{\omega^2}{c^2} p(x, y, z) = 0 \quad (\text{B.3})$$

donde  $p(x, y, z)$  es la presión acústica,  $c$  es la velocidad del sonido y  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda. La solución a esta ecuación en el campo libre, considerando a este un medio homogéneo e isotrópico es  $e^{(i\vec{k} \cdot \vec{x})}$ , donde  $|\vec{k}| = \frac{\omega}{c}$  corresponde al módulo del vector de onda que depende linealmente de la frecuencia.

En el caso de un medio periódico, la solución a la ecuación de onda se restringe a la BZ, para lo cual aplicamos el teorema de Bloch, considerando las condiciones de borde adecuadas, es decir

$$\nabla^2 p_k(\vec{r}) + \left(\frac{\omega(\vec{k})}{c}\right)^2 p_k(\vec{r}) = 0 \quad (\text{B.4})$$

y las condiciones de borde

$$p_k(\vec{r} + \vec{R}) = p_k(\vec{r}) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (\text{B.5})$$

El vector  $\vec{k}$  es un indicador del modo de propagación en la BZ, y equivale a un vector de onda en el medio periódico. De hecho para cada  $\vec{k}$  existe un número discreto infinito de valores propios que representan las frecuencias de los  $n$  modos posibles en la celda unidad. Cada modo es una función continua  $\omega_n(\vec{k})$  que representa la relación de dispersión de la banda  $n$ , y la estructura de bandas representa la relación de dispersión del medio.

A modo de ejemplo, en la figura B.1 se muestra la estructura de bandas del cristal sónico utilizado en la Sala Cristal Sónico (que describimos en el capítulo 5.5), formado por 100 columnas de madera en forma de U cuadrada de 0,15 m de lado y 2,70 m de altura. Las columnas forman un arreglo cuadrado con una periodicidad de 0,3 m. En el eje horizontal se muestra para cada  $k$ , la relación de dispersión de cada banda en el rango de frecuencias entre 0 y 9 kHz, en la dirección de simetría  $\Gamma XM\Gamma$  estándar.

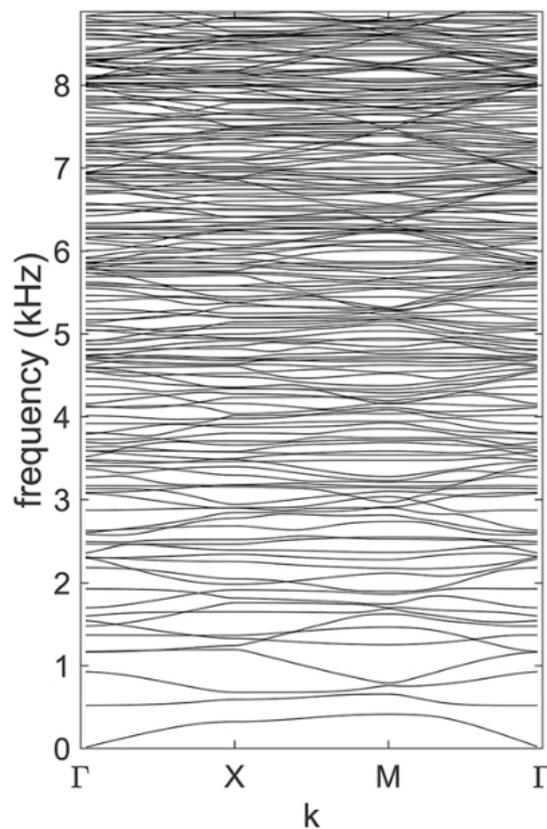


Figura B.1: Estructura de bandas del cristal sónico descrito en el capítulo 5.5, que muestra la frecuencia en función del vector de onda  $k$  en la dirección  $\Gamma XM\Gamma$  estándar

Existen diferentes métodos para calcular la estructura de bandas de un medio periódico, por ejemplo el método de expansión en ondas planas (PWE), el método de elementos finitos (FEM) o el método a partir de cálculos de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD). Los detalles del cálculo y la implementación de dichos métodos exceden el alcance de esta tesis.

La estructura de bandas muestra algunas propiedades interesantes de los sistemas periódicos.

cos, como por ejemplo las bandas prohibidas acústicas, o el fenómeno de focalización por refracción negativa. Dichas propiedades serán analizadas a continuación.

# Apéndice C

## Convolución dependiente del tiempo

En la operación de convolución entre dos señales  $x$  y  $y$  ambas señales se pueden interpretar como un filtro que opera sobre la otra y viceversa, y en el que una es la señal de entrada del filtro y la otra es la respuesta impulsiva del filtro. Entonces, dada una señal de entrada  $x(n)$  la salida del filtro  $y(n)$  es la suma ponderada muestra a muestra de la multiplicación entre la respuesta impulsiva del filtro  $h(n)$  y la señal de entrada  $x(n)$ . Más precisamente  $h(n)$  es la respuesta del filtro a una entrada impulso  $\delta(n - i)$  desplazada a la derecha en  $i$  muestras y asociada a dicho filtro en el tiempo de  $n$  muestra. Entonces, dada una señal de entrada  $x(n)$ , la señal de salida  $y(n)$  del filtro se puede definir como la convolución entre  $x$  y la señal impulsiva de entrada  $\delta$  para el tiempo de  $n$  muestra:

$$y(n) = x * \delta \tag{C.1}$$

donde el símbolo  $*$  denota la operación de convolución. La convolución entre  $x$  y  $\delta$  se define como

$$y(n) = \sum_{i=0}^n x(i)\delta(i - n) \tag{C.2}$$

Y como la respuesta del filtro en el tiempo de  $n$  muestra a un impulso que ocurrió en el

tiempo de  $i$  muestra es  $h(n, i)$ , entonces  $\delta(i - n) \equiv h(n, i)$ . Por lo tanto podemos escribir

$$= y(n) = \sum_{i=0}^n x(i)h(n, i) \quad (\text{C.3})$$

Si además de ser lineal, el filtro es invariante en el tiempo,  $h(n, i) = h(n - i)$ , entonces

$$= y(n) = \sum_{i=0}^n x(i)h(n - i) = (x * h)(n), n = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{C.4})$$

que establece que la salida del filtro  $y$  es la convolución de la entrada  $x$  con la respuesta impulsiva  $h$ .

# Apéndice D

## Publicaciones y presentaciones

### Publicaciones en revistas:

- Leonardo Salzano y Manuel C Eguia. «IRIS: A tunable sound sculpture based on acoustic periodic composites for musical performance». En: *Journal of New Music Research* (2022), págs. 1-13

### Presentaciones a congresos y conferencias:

- Valeria Sol Gomez, Lucas González y Leonardo Salzano. «Activación selectiva del espejo de reversión temporal mediante un cristal sónico de geometría variable». En: *XXVII Jornadas de Jovens Pesquisadores*. (2019), págs. 1–12.
- Valeria Sol Gomez, Alejo Alberti, Ignacio Spiouzas, Leonardo Salzano, Oscar Edelstein, Manuel Eguia. «Tunable sonic crystals as an extension of acoustical musical instruments». En: *International Symposium on Musical and Room Acoustics*. La Plata, Argentina. Instrument Making. (2016).

### Actividades de divulgación:

- *Charla sobre el montaje de la Sala Cristal Sónico* - Manuel C. Eguia, Valeria Sol Gomez, Lucas González, Leonardo Salzano - Arduino Day - Universidad Nacional de Quilmes - Bernal, Argentina (2019)
- *Esculturas sonoras aplicadas al diseño de salas de concierto* - Jornada de Becarios y Tesistas - Universidad Nacional de Quilmes - Bernal, Argentina (2017)

- *La Experiencia Iridiscente: Escultura de Luz y Sonido* - Jornadas de Arte, Música y Tecnología - Universidad Nacional de Quilmes - Bernal, Argentina (2017)
- *Acústica de placas perforadas e iridiscencia acústica en metamateriales* - FASE 8, Festival de Arte, Ciencia y Tecnología - Centro Cultural Recoleta - C.A.B.A., Argentina (2016)
- *Montaje de un cristal sónico para experiencias interactivas con el público* - Manuel C. Eguia, Valeria Sol Gomez, Alejo Alberti, Leonardo Salzano - Octubre: Mes del Sonido - Centro Cultural de la Ciencia - C.A.B.A., Argentina (2016)

# Índice de figuras

2.1. Ejemplo de oscilador armónico amortiguado. Un disco está fijo a la masa y sumergido en un fluido que ejerce una fuerza amortiguadora $-\mu y$ . La fuerza elástica restauradora es $-kx$ . . . . .	9
2.2. Modelo del oscilador frotado . . . . .	12
2.3. Fricción del sistema en función del deslizamiento . . . . .	12
2.4. Primeros cinco modos del número infinito de grados de libertad de una cuerda ideal. Adaptado de Loy [81]. . . . .	15
2.5. El arpa eólica, tal como la imaginó Athanasíus Kircher hacia mediados del siglo XVII . . . . .	17
2.6. Guitarra adaptada II de Harry Partch, una guitarra modificada para tocar en un sistema particular de entonación justa. Fotografiado en el Instituto Harry Partch de la Universidad Estatal de Montclair (Foto: HorsePunchKid. Con licencia CC BY-SA 3.0) . . . . .	18
2.7. Modos de una barra longitudinal con extremos libres (a) y con un extremo fijo (b). Adaptado de Fletcher [85] . . . . .	20
2.8. El Cristal Baschet, un instrumento creado por François y Bernard Baschet (Foto: Jean-Pierre Dalbéra, con licencia CC BY 2.0) . . . . .	22
2.9. Henry Bertoia, Esculturas sonoras, Chicago (Foto: Sharon Mollerus. Con licencia CC BY 2.0) . . . . .	23
2.10. Modos de desplazamiento de tubos abiertos. Adaptado de Loy [81]. . . . .	24
2.11. Modos de desplazamiento de tubos cerrados. Adaptado de Loy [81]. . . . .	25
2.12. Singing Ringing Tree, una escultura eólica diseñada por Mike Tonkin (Foto: Tom Blackwell, con licencia CC BY-NC 2.0) . . . . .	26

2.13. La escultura Aeolus, diseñada por el artista Luke Jerram en el distrito de Tower Hamlets en Canary Wharf, Londres, en marzo de 2012. Está diseñada para cantar con el viento sin necesidad de energía eléctrica. (Con licencia CC BY-SA 3.0) . . . . .	27
2.14. Órgano de mar en Zadar, Construido según planos del arquitecto Nikola Bašić. (Foto: Böhringer Friedrich, con licencia CC BY-SA 2.5) . . . . .	28
2.15. Primeros 14 modos de una membrana ideal. Arriba de cada figura se indica el nodo radial $m$ y concéntrico $n$ como $(m, n)$ , y abajo, la frecuencia relativa de cada modo. Extraído de Fletcher [85] . . . . .	29
2.16. Esfera pulsante de radio $a$ . Adaptado de Miyara [43] . . . . .	33
2.17. Resistencia a la radiación y reactancia de una esfera pulsante de radio $a$ . Tomado de la referencia [56] . . . . .	34
2.18. Ilustración esquemática de la radiación de esquina en una placa finita. Adaptación de Norton [44] . . . . .	35
2.19. Ilustración esquemática de la radiación de borde en una placa finita. Adaptación de Norton [44] . . . . .	36
2.20. Radiación sonora desde el extremo de un tubo cilíndrico. Extraído de Campbell [118] . . . . .	39
2.21. Perfil de orificio que se asemeja a una campana a partir de tres secciones cónicas con un ángulo de apertura creciente. Las líneas sólidas representan ondas esféricas centradas en A (azul), B (verde) y C (rojo). Extraído de Campbell [118] . . . . .	40
2.22. Ilustración de la definición del ángulo de directividad $\theta$ . Extraído de Campbell [118] . . . . .	41
2.23. Luigi Russolo y su colaborador Ugo Piatti en el laboratorio de Intonarumori en Milán, 1913 . . . . .	42
2.24. Ruup, de la arquitecta Birgit Öigus . . . . .	43
3.1. El fonógrafo, inventado en 1877 por Alva Edison. Es el primer dispositivo capaz de reproducir sonido . . . . .	46

3.2. <i>Pabellón Philips</i> , diseñado por el arquitecto Le Corbusier en colaboración con el compositor Iannis Xenakis . . . . .	48
3.3. Coordenadas en tres dimensiones que se utilizan en la localización de fuentes sonoras: azimuth, elevación y distancia egocéntrica. Adaptado de Loy [81] . . . . .	50
3.4. Arreglo estereofónico de parlantes. Adaptado de Rumsey [88] . . . . .	52
3.5. La torre de sonido construida a orillas del lago Biel, en ocasión de la Swiss EXPO 2002 en la que el músico Andres Bosshard montó su instalación <i>Klangturm</i> . Fuente: Norbert Aepli. Con licencia CC-BY-2.5 . . . . .	56
3.6. Ilustración de la implementación de WFS, donde $F$ es la fuente, y $W$ es el procesador matricial que extrapola el campo de ondas antes de la emisión. Adaptado de Berkhout et al. [16] . . . . .	60
3.7. Sala de conferencias H104, Universidad Técnica de Berlín . . . . .	62
3.8. Configuración básica de grabación y reproducción binaural. Adaptado de Rumsey [88] . . . . .	63
4.1. El sonido incidente se refleja parcialmente, se transmite parcialmente y se absorbe parcialmente. Adaptado de Watkinson [90] . . . . .	68
4.2. Difracción de ondas de agua que pasan a través de aberturas de varios tamaños. Cuanto más estrecha sea la abertura (en comparación con la longitud de onda), mayor será la difracción. Extraído de Rossing et al. [11] . . . . .	69
4.3. Formación de ondas estacionarias en un recinto cerrado. Adaptado de Watkinson [90] . . . . .	70
4.4. Figuras de Chladni sobre placas metálicas. Fuente: Matemateca (IME/USP)/Rodrigo Tetsuo Argenton. Con licencia CC-BY-SA 4.0 . . . . .	72
4.5. Tvisongur, de Lukas Kühne . . . . .	75
4.6. Ilustración de los conceptos de espacio de números de onda para una placa plana. Adaptación de Norton [44] . . . . .	78
4.7. Kircher, A., “Musurgia universalis”, 1650, trompeta parlante. Fuente: Wellcome Collection gallery. Con licencia CC-BY-4.0 . . . . .	81
4.8. Tres dispositivos acústicos de alerta temprana, 2360 m al este de Jack’s Court. Fuente: Teseum. Con licencia CC BY-SA 4.0 . . . . .	82

4.9. Ilustración de la parábola con la definición de parámetros. Adaptado de <a href="https://www.antenna-theory.com/">https://www.antenna-theory.com/</a> . . . . .	83
4.10. Acoustic Shells, de Flanagan Lawrence . . . . .	85
4.11. Esquemático de un cristal sónico. Adaptación de Ibiza [95] . . . . .	86
4.12. Ilustración del fenómeno de refracción negativa en un cristal sónico. Extraído de Hu et al. [46] . . . . .	87
4.13. Reflexión y refracción de una onda plana que incide oblicuamente en la interfaz aire/sólido desde el aire. Nótese la conservación del vector de onda tangencial a la interfaz. Adaptación de Sukhovich et al.[91] . . . . .	88
4.14. Superficie de isofrecuencia para un medio isótropo. Extraído de Sukhovich et al.[91] . . . . .	89
4.15. Reflexión y refracción de una onda plana que incide oblicuamente en la interfaz aire/sólido desde el aire. Nótese la conservación del vector de onda tangencial a la interfaz. Adaptación de Sukhovich et al.[91] . . . . .	90
4.16. Órgano, de Eusebio Sempere. Foto: Asqueladd. Con licencia CC BY-SA 3.0 .	91
5.1. Vista esquemática del Cristal Sónico, colocado entre la fuente (intérprete, punto azul) y la audiencia. Las ondas de sonido que irradian desde la fuente son dispersadas por las columnas del cristal sónico y luego modificadas por la habitación. Las propiedades acústicas de este dispositivo se pueden modificar cambiando su configuración geométrica, es decir, girando las columnas en forma de “U” alrededor de sus ejes verticales. Las letras rojas indican las posiciones de grabación (ver 5.3) . . . . .	96
5.2. Flujo de información acústico y háptico para (a) una interpretación musical tradicional y (b) la interpretación basada en cristales sónicos propuesta en este trabajo. Las flechas de colores representan el flujo de información para las diferentes etapas de performance . . . . .	97
5.3. Representación esquemática de las tres configuraciones estudiadas (fila superior) y mapas de niveles de presión sonora para tres frecuencias fijas obtenidos mediante un modelo FEM. . . . .	99

- 5.4. Análisis espacial y tímbrico de las notas tocadas por los músicos. En la fila superior se muestran las partituras correspondientes al saxofón barítono y alto. La intensidad binaural (BI) y la diferencia interaural de nivel (ILD) para cada armónico de la nota musical alineada verticalmente (hasta 2000 Hz) se muestran como un código de color en las dos filas inferiores. . . . . 101
- 5.5. ILD para un D4 y un B3 tocados por un saxofón barítono y alto, respectivamente. El ILD se calculó a partir de una grabación de la nota tocada mientras se realizaba un gesto de cristal sónico de seis segundos de duración. Las configuraciones intermedias de los gestos se indican en la parte inferior de la figura. . . . . 103
- 5.6. Sala Cristal Sónico, una nueva idea de teatro desarrollada de Oscar Edelstein y Manuel Eguia que trabaja con principios derivados de Sonic Crystals. La foto fue tomada durante la representación de *Viaje a la Catedral de Santa Mónica de los Venados*, ópera compuesta por Oscar Edelstein. Foto: Sergio Santillán 105
- 6.1. Diagrama de los parámetros geométricos de una malla acústica, donde  $r_0$  es el radio del agujero,  $a$  la periodicidad del arreglo y  $h$  el espesor de la placa para una red cuadrada (que es la que alcanza la presente tesis). Adaptado de Estrada et al. [92] . . . . . 108
- 6.2. Ilustración esquemática de una red acústica doble (ADF). Consiste en un par de placas de espesor  $h$ , perforadas con orificios redondos de diámetro  $d$ , en una red cuadrada de período  $p$ , separadas por un hueco  $d_g$ , y que pueden desplazarse lateralmente en los ejes  $x$  e  $y$  ( $l_x$  y  $l_y$ ). . . . . 110
- 7.1. Sound Structures, de Bernard y François Baschet. Foto: Jean-Pierre Dalbéra. Con licencia CC BY-SA 2.0 . . . . . 113
- 7.2. Serpentinata, de Bernhard Leitner, en el Festival Sonambiente de Berlín 2006. Foto: Régine Debatty. Con licencia CC BY-SA 2.0 . . . . . 114
- 7.3. IRIS durante la presentación de la ópera *Viaje a la Catedral de Santa Mónica de los Venados* en el Auditorio Nicolás Casullo de la Universidad Nacional de Quilmes, en marzo de 2019. Foto: Sergio Santillán / Foto (usada con autorización). . . . . 116

- 7.4. (a) Ilustración esquemática (no a escala) de la configuración experimental que ilustra la posición de la fuente  $S$ ,  $IRIS$   $I$ , el micrófono  $M$  en una posición arbitraria y la cabeza binaural  $H$  en la posición  $b$ . En amarillo se indica el área de medición y en rojo las tres posiciones de la cabeza binaural  $a$ ,  $b$  y  $c$ . Los ejes indican la dirección longitudinal  $y$  y transversal  $x$  de  $IRIS$ . (b)  $IRIS$  con los orificios del disco alineados. También se observa un carrito de medida con el micrófono de medición acústica frente a  $IRIS$ . (c): Las tres posiciones angulares del disco trasero de  $IRIS$  bajo estudio:  $a = 0^\circ$ ,  $a = 15^\circ$  y  $a = 45^\circ$  . 117
- 7.5. (a) Vista del modelo de  $IRIS$  y del campo de presión sonora (escala en dB) para una fuente de 2,2 kHz 1m detrás de la escultura. (b) Respuesta de magnitud (en dB) en función de la frecuencia y la posición a lo largo de la dirección  $y$  (paralela a los discos) en  $x=1$  m desde el primer disco, para cuatro ángulos del disco trasero en  $a= 0^\circ$ ,  $a= 15^\circ$ ,  $a=30^\circ$  y  $a=45^\circ$ . . . . . 120
- 7.6. Respuesta de magnitud (en dB) en función de la frecuencia y la posición (la amplitud se normalizó con la amplitud máxima) a lo largo de la dirección  $y$  (paralela a los discos) en  $x=650$  mm desde el primer disco, para tres posiciones del disco trasero de  $IRIS$  en  $a=0^\circ$  (izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (derecha).121
- 7.7. Campo de presión sonora (en dB) en el área de medición de 810 mm  $\times$  630 mm (rectángulo amarillo en la Figura 7.4 (a) para dos frecuencias fijas (2100 Hz fila superior, 2310 Hz fila inferior) y tres ángulos de rotación diferentes  $a=0^\circ$  (columna izquierda),  $a=15^\circ$  (centro) y  $a=45^\circ$  (columna derecha). . . . . 122
- 7.8. Respuesta de magnitud (en dB, amplitud normalizada) obtenida a partir de las medidas binaurales (oído izquierdo, panel izquierdo, oído derecho, panel derecho) en función de la frecuencia y el ángulo, en las posiciones a (fila superior) y c (fila inferior), como se indica en la 7.4 (a) . . . . . 123

- 7.9. Espectrograma (dB a escala completa) para el canal izquierdo (panel superior) y el canal derecho (panel central) y la diferencia de nivel interaural (ILD, panel inferior) calculada a partir de la señal que corresponde al tono sostenido convolucionado con la respuesta de impulso binaural de *IRIS*. Un valor ILD positivo corresponde a un nivel de sonido más alto en el canal izquierdo, mientras que los valores negativos corresponden a un nivel de sonido más alto en el canal derecho. . . . . 125
- 7.10. (a) Progresión de acordes (sistema de cuatro pentagramas, abajo) y tonos (pentagrama doble, arriba) correspondientes a los armónicos reforzados por *IRIS*, separados por canal (canal izquierdo, arriba, canal derecho, abajo). Entre paréntesis, al lado de cada cabeza de nota se indica la relación interválica con la tónica del acorde respectivo. La línea punteada indica la posición del disco medida en grados (ángulo). La partitura está anotada en tono de concierto, excepto los armónicos reforzados, que suenan dos octavas más altos que lo escrito. (b) ILD para cada armónico reforzado selectivamente correspondiente al acorde alineado verticalmente (entre 1 y 3 kHz). . . . . 127
- 7.11. Iridiscente en funcionamiento en FASE 8, Centro Cultural Recoleta (Noviembre/Diciembre 2016). Foto: Max Edelstein . . . . . 131
- 7.12. Diagrama que ilustra el funcionamiento de *Iridiscente* . . . . . 132
- 7.13. *IRIS* Fases Múltiples es una instalación interactiva que conecta el aspecto visual con el sonoro. Por un lado está *IRIS*, una escultura sonora formada por dos discos perforados que al rotar filtran el SONIDO e interfieren la transmisión de LUZ. Por el otro, una cámara y un micrófono registran las variaciones en las propiedades del color de la luz y de frecuencia e intensidad del sonido generadas por *IRIS*, e imprimen las cualidades del estímulo visual en el sonoro y viceversa (Texto curatorial original) . . . . . 133
- 7.14. *IRIS* durante una performance con video mapping y guitarra eléctrica procesada de Federico Joselevich Puiggrós y Leonardo Salzano. La Noche de los Museos 2019, 2 de noviembre, Centro Cultural de la Ciencia de Buenos Aires. Foto: Ezequiel Hilbert . . . . . 134

A.1. Esquema de una red puntual bidimensional en el espacio directo (red directa): (a) sección de una red cuadrada con vectores primitivos $a_1$ y $a_2$ , (b) su correspondiente celda unitaria con parámetros de red iguales a $a$ . Extraído de Zapata [86] . . . . .	142
A.2. Esquema de una red puntual bidimensional en el espacio recíproco (red recíproca): (a) sección de una red cuadrada con vectores primitivos $b_1$ y $b_2$ y construcción de una celda de Wigner-Seitz, (b) su correspondiente celda unitaria o primera zona de Brillouin. Extraído de Zapata [86] . . . . .	144
B.1. Estructura de bandas del cristal sónico descrito en el capítulo 5.5, que muestra la frecuencia en función del vector de onda $k$ en la dirección $\Gamma X M \Gamma$ estándar	147

# Referencias

- [1] Ernst Florens Friedrich Chladni. *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*. Zentralantiquariat der DDR, 1787 (vid. pág. 71).
- [2] Leo L Beranek. «Loudspeakers and microphones». En: *The journal of the acoustical society of America* 26.5 (1954), págs. 618-629 (vid. pág. 46).
- [3] Alan D Blumlein. «British patent specification 394,325 (improvements in and relating to sound-transmission, sound-recording and sound-reproducing systems)». En: *Journal of the Audio Engineering Society* 6.2 (1958), págs. 91-130 (vid. pág. 52).
- [4] Paul D Coleman. «Failure to localize the source distance of an unfamiliar sound». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34.3 (1962), págs. 345-346 (vid. pág. 51).
- [5] Harry Ferdinand Olson. *Music, Physics and Engineering: 2D*. Ed. Dover, 1967 (vid. pág. 21).
- [6] Dick Raaijmakers. *Geluid= $\dot{z}$ Kijken, Drie audio-visuele projecten. Sound= $\dot{z}$ Sight. Three Audio-visual Projects. Ton Bruynel, Dick Raaijmakers, Peter Struycken. Stedelijk Museum, Amsterdam March 5th–April 18th 1971*. 1971 (vid. pág. 32).
- [7] K Stockhausen. «Texte zur Musik, Bd. 3 (1963–1970)». En: *Du-Mont, Köln* (1971) (vid. pág. 48).
- [8] Bernard Baschet Grayson, John y Francois Baschet. «Essays on Sound sculpture». En: (1975) (vid. págs. 22, 112).
- [9] Neil W Ashcroft y N David Mermin. *Solid State Physics, Cornell University*. 1976 (vid. pág. 145).

- [10] Bernhard Leitner. *Bernhard Leitner. Sound Space Manifesto*. Consultado en Marzo 3, 2021, desde <https://www.bernhardleitner.at/texts>. 1977 (vid. pág. 54).
- [11] Thomas D Rossing y Folden B Stumpf. «The science of sound». En: *American Journal of Physics* 50.10 (1982), págs. 955-955 (vid. pág. 69).
- [12] Michael Asher. *Writings 1973-1983 on Works 1969-1979*. Vol. 15. Halifax, NS: Press of the Nova Scotia College of Art, Design y the Museum of Contemporary Art Los Angeles, p. 30, 1983 (vid. pág. 74).
- [13] John C Bennett, Keith Barker y Frederick O Edeko. «A new approach to the assessment of stereophonic sound system performance». En: *Journal of the Audio Engineering Society* 33.5 (1985), págs. 314-321 (vid. pág. 52).
- [14] Sajeev John. «Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices». En: *Physical review letters* 58.23 (1987), pág. 2486 (vid. pág. 90).
- [15] Alex D Little, Donald H Mershon y Patrick H Cox. «Spectral content as a cue to perceived auditory distance». En: *Perception* 21.3 (1992), págs. 405-416 (vid. pág. 51).
- [16] A J Berkhout, D De Vries y P Vogel. «Acoustic control by wave field synthesis». En: (1993), págs. 2764-2778 (vid. pág. 60).
- [17] Bob Gilmore. «Changing the metaphor: Ratio models of musical pitch in the work of Harry Partch, Ben Johnston, and James Tenney». En: *Perspectives of New Music* (1995), págs. 458-503 (vid. pág. 18).
- [18] R. Martínez-Sala y col. «Sound attenuation by sculpture». En: *nature* 378.6554 (1995), págs. 241-241 (vid. pág. 90).
- [19] Jens Blauert. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997 (vid. págs. 50, 51).
- [20] Janet Cardiff. *Walk Munster*. Consultado en Noviembre 10, 2021, desde <https://www.digitalartarchive.at/database/general/work/walk-muenster.html>. 1997 (vid. pág. 64).
- [21] Christian Clozier. «Composition, diffusion and interpretation in electroacoustic music». En: *Proceedings of the 1997 International Academy of Electroacoustic Music—Bourges*. Vol. 3. 1997, págs. 233-281 (vid. pág. 48).

- [22] Maryanne Amacher. «Sound Characters (Making the Third Ear)». En: *New York: Tzadik Record* (1998) (vid. pág. 79).
- [23] Richard O Duda y William L Martens. «Range dependence of the response of a spherical head model». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 104.5 (1998), págs. 3048-3058 (vid. pág. 51).
- [24] Jonty Harrison. «Sound, space, sculpture: some thoughts on the ‘what’, ‘how’ and ‘why’ of sound diffusion». En: *Organised Sound* 3.2 (1998), págs. 117-127 (vid. pág. 48).
- [25] Bernhard Leitner. *Sound: space*. Cantz, 1998 (vid. págs. 55, 84).
- [26] D. G. Malham. «Approaches to spatialisation». En: *Organised Sound* 3.2 (1998), págs. 167-177. ISSN: 1355-7718 (vid. pág. 64).
- [27] Juan V Sánchez-Pérez y col. «Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders». En: *Physical Review Letters* 80.24 (1998), pág. 5325 (vid. pág. 86).
- [28] Michael Brewster. «There or Here?» En: *Site of Sound. Of Architecture and the Ear* (1999), p. 103 (vid. pág. 73).
- [29] Douglas S Brungart y William M Rabinowitz. «Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 106.3 (1999), págs. 1465-1479 (vid. pág. 51).
- [30] Jonty Harrison. «Diffusion: theories and practices, with particular reference to the BEAST system». En: *econtact* 2 (1999), págs. 1-9 (vid. pág. 48).
- [31] Harry Partch. *Bitter Music: Collected Journals, Essays, Introductions, and Librettos*. Vol. 543. University of Illinois Press, 2000 (vid. pág. 112).
- [32] Francisco Cervera y col. «Refractive acoustic devices for airborne sound». En: *physical review letters* 88.2 (2001), pág. 023902 (vid. pág. 86).
- [33] Ville Pulkki. «Spatial Sound Generation and Perception». En: *Chamber Music* (2001) (vid. págs. 52, 54, 60).
- [34] W Anthony Sheppard. *Revealing masks: exotic influences and ritualized performance in modernist music theater*. Vol. 1. Univ of California Press, 2001 (vid. pág. 18).

- [35] Bernd Schulz. *Resonances: aspects of sound art*. Kehrer Verlag Heidelberg, 2002 (vid. pág. 114).
- [36] Pavel Zahorik. «Direct-to-reverberant energy ratio sensitivity». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 112.5 (2002), págs. 2110-2117 (vid. pág. 51).
- [37] Javier Ariza. *Las imágenes del sonido*. 2003 (vid. pág. 84).
- [38] Mark Bain. «The Live Room: Transducing resonant architectures». En: *Organised Sound* 8.2 (2003), págs. 163-170. ISSN: 14698153 (vid. pág. 79).
- [39] Bikash C Gupta y Zhen Ye. «Theoretical analysis of the focusing of acoustic waves by two-dimensional sonic crystals». En: *Physical Review E* 67.3 (2003), pág. 036603 (vid. pág. 86).
- [40] Hannes Holzl. «Can we create Space by means of sound? The Quest for the Spatial Dimension in Audio Arts». En: *August* (2003) (vid. pág. 55).
- [41] Bernhard Leitner. «Headscapes». En: *Earshot* 4 (2003), p. 72 (vid. pág. 54).
- [42] Bernhard Leitner. *KÖPFRAUME/HEADSCAPES*. Edition ZKM, 2003 (vid. pág. 65).
- [43] Federico Miyara. «Introducción a la Acústica». En: *Publicación interna de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR Rosario (Arg.)* (2003) (vid. pág. 33).
- [44] Michael Peter Norton y Denis G Karczub. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. Cambridge university press, 2003 (vid. págs. 35, 36, 78).
- [45] Liang-Shan Chen, Chao-Hsien Kuo y Zhen Ye. «Acoustic imaging and collimating by slabs of sonic crystals made from arrays of rigid cylinders in air». En: *Applied physics letters* 85.6 (2004), págs. 1072-1074 (vid. pág. 86).
- [46] Xinhua Hu y col. «Superlensing effect in liquid surface waves». En: *Physical Review E* 69.3 (2004), pág. 030201 (vid. pág. 87).
- [47] Suxia Yang y col. «Focusing of sound in a 3D phononic crystal». En: *Physical review letters* 93.2 (2004), pág. 024301 (vid. págs. 90, 110).
- [48] R Moussa y col. «Negative refraction and superlens behavior in a two-dimensional photonic crystal». En: *Physical Review B* 71.8 (2005), pág. 085106 (vid. pág. 89).

- [49] Cristina PALMESE. «CARLES, José. L. Acústica y Arquitectura: El marco Acústico y Su Evolución.[en línea]». En: *Revista Scherzo* 193 (2005) (vid. pág. 41).
- [50] Liang Feng y col. «Acoustic backward-wave negative refractions in the second band of a sonic crystal». En: *Physical review letters* 96.1 (2006), pág. 014301 (vid. pág. 86).
- [51] Brandon Labelle. *Perspectives on Sound Art*. 2006. ISBN: 9780826418449 (vid. págs. 73, 74, 79).
- [52] Gerriet K. Sharma. *ABANDONEE*. <https://www.gksh.net/portfolio/abandonee-2/>, last accessed on 2021-11-3. 2006 (vid. pág. 59).
- [53] Gerriet K. Sharma. *AUBAINE*. Consultado en Noviembre 5, 2021, desde <https://www.gksh.net/portfolio/aubaine-2/>. 2006 (vid. pág. 61).
- [54] François Bayle. «Space, and more». En: *Organised Sound* 12.3 (2007), págs. 241-249 (vid. pág. 48).
- [55] Bill y Mary Buchen. *Sonic Architecture*. Consultado en Julio 7, 2021 desde <http://sonicarchitecture.com/otw-portfolio/slapped-pipes/>. 2007 (vid. pág. 25).
- [56] Andrzej Dobrucki. *Przetworniki elektroakustyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa, Poland, 2007 (vid. pág. 34).
- [57] Angelo Farina. «Advancements in impulse response measurements by sine sweeps». En: *Audio Engineering Society Convention 122*. Audio Engineering Society. 2007 (vid. pág. 118).
- [58] Bo Hou y col. «Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves». En: *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 76.5 (2007), págs. 1-6 (vid. pág. 109).
- [59] Bo Hou y col. «Tuning Fabry-Perot resonances via diffraction evanescent waves». En: *Physical Review B* 76.5 (2007), pág. 054303 (vid. pág. 109).
- [60] Ming-Hui Lu y col. «Extraordinary acoustic transmission through a 1D grating with very narrow apertures». En: *Physical review letters* 99.17 (2007), pág. 174301 (vid. págs. 3, 109).

- [61] Ming-Hui Lu y col. «Negative birefracton of acoustic waves in a sonic crystal». En: *Nature materials* 6.10 (2007), págs. 744-748 (vid. pág. 86).
- [62] David Casadevall. *Escultura Sonora Instrumento Músico*. Consultado en Diciembre 18, 2020, desde <https://www.acusticaweb.com/musica-y-arte-sonoro/blog/ma-y-arte-sonoro/escultura-sonora-instrumento-mo.html>. 2008 (vid. pág. 85).
- [63] Johan Christensen, Luis Martin-Moreno y Francisco Jose Garcia-Vidal. «Theory of resonant acoustic transmission through subwavelength apertures». En: *Physical review letters* 101.1 (2008), pág. 014301 (vid. págs. 108, 109).
- [64] Héctor Estrada y col. «Extraordinary sound screening in perforated plates». En: *Physical review letters* 101.8 (2008), pág. 084302 (vid. págs. 3, 109).
- [65] Héctor Estrada y col. «Extraordinary sound screening in perforated plates». En: *Physical review letters* 101.8 (2008), pág. 084302 (vid. pág. 109).
- [66] «Mapping the Invisible Landscape: An Exercise in Spatially Choreographed Sound». En: *Architectural Design* 78.4 (2008), págs. 89-103. ISSN: 00038504 (vid. pág. 74).
- [67] Barry Blesser y Linda-Ruth Salter. *Spaces speak, are you listening?: experiencing aural architecture*. MIT press, 2009 (vid. pág. 90).
- [68] Héctor Estrada y col. «Influence of lattice symmetry on ultrasound transmission through plates with subwavelength aperture arrays». En: *Applied Physics Letters* 95.5 (2009), pág. 051906 (vid. pág. 109).
- [69] Art of Failure. *Resonant Architecture - Architecture as an Instrument*. Consultado en Febrero 26, 2021, desde <https://resonantarchitecture.com/>. 2009 (vid. pág. 79).
- [70] Raviv Ganchrow. «Perspectives on Sound-Space: The Story of Acoustic Defense». En: *Leonardo Music Journal* 19 (2009), págs. 71-75 (vid. pág. 82).
- [71] Mara Mills. «When mobile communication technologies were new». En: *Endeavour* 33.4 (2009), págs. 141-147 (vid. pág. 42).
- [72] Gerriet Sharma. *Komposition. Eine Insel im Klang*. Consultado en Noviembre 3, 2021, desde <http://iland.gksh.net/Komposition.html>. 2009 (vid. pág. 59).

- [73] Johan Christensen. «Acoustical wave phenomena: enhanced transmission, guiding, attenuation and focusing». En: (2010) (vid. pág. 109).
- [74] Johan Christensen, Luis Martián-Moreno y FJ Garcia-Vidal. «All-angle blockage of sound by an acoustic double-fishnet metamaterial». En: *Applied Physics Letters* 97.13 (2010), pág. 134106 (vid. pág. 110).
- [75] F Gautier y col. «Acoustics of the Cristal Baschet». En: (2010), págs. 1-4 (vid. pág. 21).
- [76] Zhifeng Liu y Guojun Jin. «Acoustic transmission resonance and suppression through double-layer subwavelength hole arrays.» En: *Journal of physics. Condensed matter : an Institute of Physics journal* 22.30 (2010), pág. 305003. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21399354> (vid. págs. 3, 109).
- [77] David Prior. «The Cochlea Unwound: A case study for a listening aid using a sonic crystal array». En: *Performance Research* 15.3 (2010), págs. 95-102 (vid. pág. 91).
- [78] Peter Michael Traub. «Spatial Exploration: Physical, Abstracted and Hybrid Spaces as Compositional Parameters in Sound Art». Tesis doct. 2010 (vid. pág. 45).
- [79] Trevor J Cox. «Acoustic iridescence». En: *The Journal of the Acoustical Society of America* 129.3 (2011), págs. 1165-1172 (vid. pág. 131).
- [80] Lukas Kühne. *Cromático*. Consultado en Febrero 26, 2021, desde <http://www.lukaskuehne.com/CROMATICO.pdf>. 2011 (vid. pág. 75).
- [81] Gareth Loy. *Musimathics, Volume 1: The Mathematical Foundations of Music*. Vol. 1. MIT press, 2011 (vid. págs. 15, 24, 25, 50).
- [82] John Wynne. *Installation no 1 for high and low frequencies*. Consultado en Febrero 26, 2021, desde [http://www.sensitivebrigade.com/High\\_and\\_Low.htm](http://www.sensitivebrigade.com/High_and_Low.htm). 2011 (vid. pág. 75).
- [83] Natasha Barrett. *Hidden Values (2012) 22'00*. Consultado en Octubre 28, 2021, desde [http://www.natashabarrett.org/Hidden\\_values.html](http://www.natashabarrett.org/Hidden_values.html). 2012 (vid. pág. 58).
- [84] Esteban R Calcagno y col. «The role of vision in auditory distance perception». En: *Perception* 41.2 (2012), págs. 175-192 (vid. pág. 51).

- [85] Neville H Fletcher y Thomas D Rossing. *The physics of musical instruments*. Springer Science & Business Media, 2012 (vid. págs. 20, 29).
- [86] Nicolás Guarín Zapata y col. «Simulación numérica de problemas de propagación de ondas: dominios infinitos y semi-infinitos». Tesis doct. Universidad EAFIT, 2012 (vid. págs. 142, 144).
- [87] Brian CJ Moore. *An introduction to the psychology of hearing*. Brill, 2012 (vid. pág. 71).
- [88] Francis Rumsey. *Spatial audio*. Routledge, 2012 (vid. págs. 52, 63).
- [89] Douglas Simpson. *Making Tracks feat. Linkage*. Consultado en Marzo 3, 2021, desde <https://laescuchaatentaediciones.bandcamp.com/track/making-tracks-feat-linkage>. 2012 (vid. pág. 66).
- [90] John Watkinson. *The art of sound reproduction*. Routledge, 2012 (vid. págs. 68, 70).
- [91] Pierre A Deymier. *Acoustic metamaterials and phononic crystals*. Vol. 173. Springer Science & Business Media, 2013 (vid. págs. 88-90).
- [92] Héctor Estrada y col. «Ultrasound Transmission Through Periodically Perforated Plates». En: *Acoustic Metamaterials*. Springer, 2013, págs. 83-113 (vid. pág. 108).
- [93] Laura Maes. «Sounding sound art: a study of its definition, origin, context and techniques of sound art». Tesis doct. Ghent University, 2013 (vid. pág. 17).
- [94] «On Soundscapes, Phonography, and Environmental Sound Art». En: January 2013 (2013). ISSN: 2212-6252 (vid. pág. 58).
- [95] Fernando Tomàs Ibiza. «Estudio numérico de la focalización de ondas evanescentes con una estructura periódica». Tesis doct. Universitat Politècnica de València, 2013 (vid. pág. 86).
- [96] Thomas L Hankins y Robert J Silverman. «Instruments and the Imagination». En: *Instruments and the Imagination*. Princeton University Press, 2014 (vid. pág. 17).
- [97] Mostafa Refat Ismail. «Soniferous Architecture: From Archaeo-Acoustics Towards the Soundsculpture Aural Era». En: *International Journal of Art, Culture and Design Technologies (IJACDT)* 4.1 (2014), págs. 42-62 (vid. pág. 25).

- [98] Flanagan Lawrence. *Acoustics Shells*. Consultado en Diciembre 18, 2020, desde <https://www.flanaganlawrence.com/acoustic-shells>. 2014 (vid. pág. 85).
- [99] Peter Bosch y Simone Simons. *Declaración del artista: Peter Bosch y Simone Simons - Mirlitones: una experiencia sónica física y sensorial*. Consultado en Julio 12, 2021, desde [http://www.isea-archives.org/symposia/isea2015\\_artist\\_statement\\_bosch\\_simons/](http://www.isea-archives.org/symposia/isea2015_artist_statement_bosch_simons/). 2015 (vid. pág. 26).
- [100] Lorenzo Di Stasi. *Birgit Öigus: La voz del bosque*. Consultado en Diciembre 30, 2020, desde <https://cafebabel.com/es/article/birgit-oigus-la-voz-del-bosque-5ae00a77f723b35a145e65af/>. 2015 (vid. pág. 43).
- [101] Ian A Drumm y col. «The Aeolus project: Science outreach through art». En: *Public Understanding of Science* 24.3 (2015), págs. 375-385 (vid. pág. 27).
- [102] Vadim Keylin. «Corporeality of music and sound sculpture». En: *Organised Sound* 20.2 (2015), págs. 182-190 (vid. pág. 113).
- [103] Ignacio Spiouzas y col. «An auditory illusion of proximity of the source induced by sonic crystals». En: *PloS one* 10.7 (2015), e0133271 (vid. págs. 86, 124).
- [104] Antoine Chaigne y Jean Kergomard. *Acoustics of musical instruments*. Springer, 2016 (vid. pág. 39).
- [105] Zach Layton. *EMPAC Unveils Newly Constructed 500-Channel 'Wave Field Synthesis' Audio System*. Consultado en <https://everydaymatters.rpi.edu/empac-unveils-new-audio-system/>. 2016 (vid. pág. 61).
- [106] Carmelo Saitta. «El timbre como factor estructurante». En: (2016), págs. 27-30 (vid. pág. 1).
- [107] Gerriet K Sharma. «Composing with Sculptural Sound Phenomena in Computer Music». Tesis doct. 2016 (vid. págs. 59, 61).
- [108] «UC Riverside UC Riverside Electronic Theses and Dissertations». En: *UC Riverside Doctoral D* (2016), p. 16. ISSN: 0100-6916 (vid. pág. 73).
- [109] Cathy Van Eck. «Between Air and Electricity - Microphones and Loudspeakers as Musical Instruments». En: (2017) (vid. pág. 31).

- [110] Christoph Cox. *Sonic Flux*. 2018 (vid. págs. 53, 78).
- [111] Asbjorn Blokkum Flo. «Materiality in sound art». En: *Organised Sound* 23.3 (2018), págs. 225-234. ISSN: 14698153 (vid. pág. 31).
- [112] Zach Layton. *512 Voices (for Soprano)*. Consultado en Noviembre 5, 2021 <https://zachlayton.bandcamp.com/track/512-voices-for-soprano>. 2018 (vid. pág. 61).
- [113] Lamberto Tronchin y David J Knight. «Transmitting acoustic phenomena and aural illusions: Examples from Athanasius Kircher's Phonosophia anacamptica». En: *Building Acoustics* 25.2 (2018), págs. 101-110 (vid. pág. 80).
- [114] Merrilee Wolsey. *Perceiving Voices in Contemporary Art: An auditory exploration of image, sculpture and architecture*. Vol. 53. 9. 2018, págs. 1689-1699. ISBN: 9788578110796. eprint: [arXiv:1011.1669v3](https://arxiv.org/abs/1011.1669v3) (vid. pág. 65).
- [115] Marek Jan Chodakiewicz. «The Liberation». En: *Intermarium* 5.1 (2019), págs. 211-235 (vid. pág. 47).
- [116] Jaeyub Hyun y col. «Achromatic acoustic gradient-index phononic crystal lens for broadband focusing». En: *Applied Physics Letters* 116.23 (2020), pág. 234102 (vid. pág. 110).
- [117] Sedlak Rissland. *Sonic Sofa - SRAP*. Consultado en Diciembre 18, 2020, desde <https://www.srap.land/projects/sonic-sofa/>. 2020 (vid. pág. 28).
- [118] Murray Campbell. *The Science of Brass Instruments*. 2021. ISBN: 9783030556846 (vid. págs. 39-41).
- [119] Leonardo Salzano y Manuel C Eguia. «IRIS: A tunable sound sculpture based on acoustic periodic composites for musical performance». En: *Journal of New Music Research* (2022), págs. 1-13 (vid. pág. 151).